



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Departamento de Tecnología Electrónica

**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA EL
ACCIONAMIENTO DE SOLENOIDES
UTILIZADOS EN IMPRESORAS
BRAILLE**

Proyecto Fin de Carrera

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

AUTOR: LEANDRO E. BOYANO VANNUCCHI

TUTORES: CRISTINA FERNÁNDEZ HERRERO

CLARA MARINA SANZ GARCÍA

JULIO 2006

Sería difícil reflejar en pocas líneas mi agradecimiento a tantas personas que con su valioso apoyo, su confianza y su generosa amistad me han ayudado a elaborar este proyecto, fruto de un arduo trabajo, que sin su permanente estímulo no se hubiera podido plasmar en lo que aquí se recoge.

A mi familia, por su confianza incondicional a pesar de mis largas ausencias por casa. Siempre animándome a seguir con alegría y dedicación la ampliación de mis conocimientos.

A mis amigos tengo que agradecerles haber sido el soporte fundamental en mi transitar diario en la universidad. Son ellos quienes me han aportado el entusiasmo y valor suficientes para proseguir con mi formación.

A mis compañeros, con los que he tenido la suerte de vivir momentos alegres y de superar instantes difíciles.

A mis tutoras y a mis compañeros del Departamento de Tecnología Electrónica, que con sus consejos, colaboraciones, críticas y sugerencias me han ofrecido su inestimable ayuda y me han brindado la oportunidad de aprender junto a ellos.

Y por supuesto, a la persona que más debo agradecer, por infundirme la ética y el rigor necesarios para completar esta etapa de mi vida.

Mamá, te lo dedico.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Planteamiento y objetivos del proyecto.....	1
2. Introducción.....	5
2.1. Orígenes de la escritura en relieve.....	7
2.2. El sistema Braille.....	9
2.3. La impresora Braille de tipo impacto.....	10
2.3.1. El solenoide.....	12
2.3.2. El accionador de los solenoides.....	13
3. Estudio del solenoide.....	17
3.1. Caracterización eléctrica del solenoide.....	19
3.2. Técnicas para el control del solenoide.....	26
3.3. Implementación del circuito de control.....	29
3.3.1. Descripción del sistema de control.....	30
3.3.2. Descripción de la secuencia de control.....	33
3.4. Análisis comparativo.....	35
3.4.1. Punto de vista eléctrico.....	36
3.4.2. Calidad del punto.....	40
3.4.3. Ruido de impresión.....	41
3.4.4. Temperatura.....	42
3.4.5. Conclusiones del análisis comparativo.....	46
4. Estudio de los distintos accionadores del solenoide.....	47
4.1. Objetivos.....	49
4.2. Condiciones de comparación.....	50
4.3. Descripción del funcionamiento de la topología original.....	52
4.4. Topologías estudiadas.....	54
4.5. Topología elevadora.....	55
4.5.1. Descripción del funcionamiento.....	56
4.5.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño....	56
4.5.3. Medidas experimentales.....	67
4.5.4. Conclusiones relativas a la topología elevadora.....	68



4.6. Topología elevadora con reutilización de energía.....	69
4.6.1. Descripción del funcionamiento.....	70
4.6.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño....	71
4.6.3. Conclusiones relativas a la topología elevadora con reutilización de energía.....	75
4.7. Convertidor directo con doble interruptor.....	76
4.7.1. Descripción del funcionamiento.....	77
4.7.2. Medidas experimentales.....	80
4.7.3. Conclusiones relativas al convertidor directo con doble interruptor.....	82
4.8. Topología con red de desmagnetización RD.....	83
4.8.1. Descripción del funcionamiento.....	84
4.8.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño....	85
4.8.3. Medidas experimentales.....	89
4.8.4. Conclusiones relativas a la topología con red de desmagnetización RD.....	91
4.9. Comparativa entre las diferentes alternativas.....	92
5. Estudio económico.....	95
5.1. Costes de desarrollo.....	92
5.2. Presupuesto del proyecto.....	92
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	99
Bibliografía y referencias.....	105
Anexos.....	109
ANEXO 1. Código VHDL para el control de los solenoides.....	111
ANEXO 2. Secuencias y flujogramas de las señales de control.....	127
ANEXO 3. Plataforma de ensayos.....	133



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Alfabeto Braille básico.....	9
Figura 2.2. Impresora Braille de tipo Impacto.....	10
Figura 2.3. Funcionamiento de la impresora Braille de tipo impacto.....	11
Figura 2.4. Líneas de campo magnético por el solenoide al introducir un elemento ferromagnético en su interior.....	13
Figura 2.5. Gobierno en modo tensión del solenoide. Configuración original..	14
Figura 2.6. Corriente por el solenoide en condiciones de funcionamiento comúnmente utilizadas en impresoras Braille.....	15
Figura 3.1. Elementos de un solenoide.....	19
Figura 3.2. Líneas de campo magnético en el solenoide al introducir el vástago metálico.....	20
Figura 3.3. Tipos de solenoide.....	21
Figura 3.4. Topología elevadora empleada para la realización de ensayos con los solenoides.....	22
Figura 3.5. Banco de pruebas.....	23
Figura 3.6. Formas de corriente en el solenoide aplicando un pulso único. <i>Solenoide Tipo A. $f=1\text{Hz}$</i>	24
Figura 3.7. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 1.....	28
Figura 3.8. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 2.....	28
Figura 3.9. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 3.....	29
Figura 3.10. Spartan-3 Starter Kit de Xilinx.....	30
Figura 3.11. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control.	31
Figura 3.12. Hoja de cálculo para la obtención de los parámetros del circuito de control digital.....	33



Figura 3.13. Formación de la señal de control completa.....	34
Figura 3.14. Diagrama de bloques básico del sistema de generación de pulsos	34
Figura 3.15. Formas de onda simuladas de la señal de control.....	35
Figura 3.16. Formas de corriente por el <i>solenoides tipo A</i> al aplicar diversas formas de disparo. $V_E=24\text{ V}$	37
Figura 3.17. Formas de corriente por el <i>solenoides tipo B</i> al aplicar diversas formas de disparo. $V_E=24\text{ V}$	38
Figura 3.18. Topología original empleada para el accionamiento de los solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto.....	43
Figura 4.1. Modelo simulado del <i>solenoides tipo B</i>	50
Figura 4.2. Respuesta real del <i>solenoides tipo B</i>	51
Figura 4.3. Respuesta simulada del <i>solenoides tipo B</i>	51
Figura 4.4. Modelo de control de los solenoides de las impresoras Braille.....	52
Figura 4.5. Configuración original del accionador del solenoide.....	53
Figura 4.6. Forma de la corriente que circula por el solenoide al emplear la topología original.....	54
Figura 4.7. Esquema de la topología elevadora.....	55
Figura 4.8. Forma de la corriente que circula por el solenoide al emplear la topología original.....	56
Figura 4.9. Formas de onda más significativas de la topología elevadora obtenidas con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $1\text{ }\mu\text{F}$, condensador de salida $1000\text{ }\mu\text{F}$, resistencia de carga $25\text{ }\Omega$, tensión media de salida 82 V , potencia media disipada en la carga 289 W	57
Figura 4.10. Formas de onda más significativas de la topología elevadora obtenidas con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $15000\text{ }\mu\text{F}$, condensador de salida $1000\text{ }\mu\text{F}$, resistencia de carga $25\text{ }\Omega$, tensión media de salida $85,6\text{ V}$, potencia media disipada en la carga 315	58



Figura 4.11. Forma de corriente por el solenoide al aplicar un pulso de disparo.....	59
Figura 4.12. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 100 μ F, condensador de salida 100 μ F, resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 74 V, potencia media disipada en la carga 302 W.....	60
Figura 4.13. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 100 μ F, condensador de salida 100 μ F, resistencia de carga 35 Ω , tensión media de salida 83,3 V, potencia media disipada en la carga 284 W.....	61
Figura 4.14. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 100 μ F, condensador de salida 100 μ F, resistencia de carga 50 Ω , tensión media de salida 97 V, potencia media disipada en la carga 270 W.....	61
Figura 4.15. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 1 μ F, condensador de salida 4,7 μ F, resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 46 V, potencia media disipada en la carga 265 W.....	63
Figura 4.16. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 1 μ F, condensador de salida 47 μ F, resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 70 V, potencia media disipada en la carga 299 W.....	64
Figura 4.17. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 1 μ F, condensador de salida 1000 μ F, resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 82 V, potencia media disipada en la carga 289 W.....	64
Figura 4.18. Formas de onda más representativas del elevador obtenidas en plataforma de ensayos.....	67
Figura 4.19. Esquema de la topología elevadora con reutilización de energía..	69
Figura 4.20. Corrientes convergentes a la entrada del convertidor elevador....	71



Figura 4.21. Formas de onda de la corriente por los solenoides y por el reductor.....	71
Figura 4.22. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_O=100\ \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=2\ \text{mH}$	72
Figura 4.23. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_O=470\ \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=2\ \text{mH}$	73
Figura 4.24. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_O=100\ \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=0.5\ \text{mH}$	74
Figura 4.25. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_O=100\ \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=2\ \text{mH}$	74
Figura 4.26. Topología del convertidor directo con doble interruptor.....	77
Figura 4.27. Funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor....	77
Figura 4.28. Formas de onda más significativas del funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor.....	78
Figura 4.29. Funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor teniendo en cuenta la influencia de la R parásita del solenoide...	79
Figura 4.30. Corriente de entrada y corriente por el solenoide al aplicar un pulso en el convertidor directo con doble interruptor: tiempo de magnetización $0,8\ \text{ms}$ y tiempo de desmagnetización $0,29\ \text{ms}$	79
Figura 4.31. Formas de onda más significativas para el convertidor directo con doble interruptor.....	80
Figura 4.32. Forma experimental de corriente por el solenoide en el convertidor directo con doble interruptor al aplicar 3 pulsos de disparo consecutivos.....	81



Figura 4.33. Forma experimental de tensión y corriente por los diodos de desmagnetización en el convertidor directo con doble interruptor al aplicar un pulso de disparo.....	81
Figura 4.34. Principales tensiones en el convertidor directo con doble interruptor y corriente por el solenoide.....	82
Figura 4.35. Topología original de magnetización y desmagnetización del solenoide.....	84
Figura 4.36. Topología con red de desmagnetización RD.....	84
Figura 4.37. Funcionamiento de la topología con desmagnetización mediante diodo y resistencia.....	85
Figura 4.38. Corriente por el solenoide y tiempos de desmagnetización al variar la resistencia en serie con el diodo.....	86
Figura 4.39. Corriente por el solenoide y tiempos de desmagnetización de las topologías: convertidor elevador y convertidor directo con doble interruptor.....	87
Figura 4.40. Formas de onda más significativas de la topología con red de desmagnetización RD obtenidas con una resistencia de desmagnetización de 500 Ω : tiempo de desmagnetización de cada solenoide 20 μ s, tensión máxima en el diodo 41,8 V, tensión máxima en el interruptor 3180 V y potencia de entrada 940 W.....	87
Figura 4.41. Formas de onda más significativas de la topología con red de desmagnetización RD obtenidas con una resistencia de desmagnetización de 10 Ω : tiempo de desmagnetización de cada solenoide 0,5 ms, tensión máxima en el diodo 41,9 V, tensión máxima en el interruptor 165 V y potencia de entrada 966 W.....	88
Figura 4.42. Formas de onda experimentales más representativas de la topología original obtenidas mediante la plataforma de ensayos.....	90
Figura 4.43. Formas de onda experimentales más representativas de la topología con red de desmagnetización RD ($R_{desmag}=22 \Omega$) obtenidas mediante la plataforma de ensayos.....	91
Figura 4.44. Formas de onda experimentales más representativas de la topología con red de desmagnetización RD ($R_{desmag}=47 \Omega$) obtenidas mediante la plataforma de ensayos.....	91



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Medida de la impedancia de los solenoides a $f=100$ Hz. Mínimo recorrido del vástago.....	21
Tabla 3.2. Medida de la impedancia del solenoide a $f=100$ Hz. Mínimo recorrido del vástago.....	21
Tabla 3.3. Medida de la impedancia del solenoide a $f=100$ Hz. Máximo recorrido del vástago.....	22
Tabla 3.4. Comparación de la carga necesaria para el acercamiento y la impresión del solenoide, medida a partir de una señal de pulso único y con una tensión de entrada de 42V.....	36
Tabla 3.5. Valores de corriente máxima y tiempos de magnetización y desmagnetización para los distintos tipos de disparo del <i>solenoide tipo A</i>	39
Tabla 3.6. Valores de corriente máxima y tiempos de magnetización y desmagnetización para los distintos tipos de disparo del <i>solenoide tipo B</i>	39
Tabla 3.7. Medida de variación de la temperatura del <i>solenoide tipo A</i>	44
Tabla 3.8. Medida de variación de la temperatura del <i>solenoide tipo B</i>	44
Tabla 3.9. Variación de la temperatura del <i>solenoide tipo A</i> con la topología original. $f=5$ Hz.....	45
Tabla 4.1. Análisis de sensibilidad a la resistencia de carga.....	62
Tabla 4.2. Pares de valores de condensador de salida y resistencia de carga para llegar al límite del Reglamento de Baja Tensión (valor medio de tensión menor de 75V), con el condensador de entrada fijado en 1 μ F.....	66
Tabla 4.3. Valores más significativos del circuito elevador con reutilización de energía.....	75
Tabla 4.4. Valores más significativos del análisis de sensibilidad de la topología con red de desmagnetización RD.....	89
Tabla 4.5. Cuadro resumen de las cuatro topologías analizadas.....	92



CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DEL PROYECTO



La realización de este proyecto se ha llevado a cabo en el grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia, perteneciente al Departamento de Tecnología Electrónica. El objetivo principal del mismo consiste en mejorar el funcionamiento de las impresoras Braille de tipo impacto. La denominación de la impresora se debe a que el carácter Braille impreso se obtiene por el impacto de un elemento metálico sobre el papel. Este elemento electro-mecánico se llama solenoide (conocido también como martillo electro-mecánico) y está formado por una parte fija llamada encapsulado y otra móvil que se denomina vástago. Al aplicar una tensión al solenoide, la parte móvil se desplaza impactando sobre el papel y realizando un *punto* que configura el carácter o unidad básica Braille.

A continuación se describen brevemente los distintos pasos seguidos durante el transcurso del proyecto:

En primer lugar, se analizará el comportamiento del solenoide desde distintos puntos de vista:

- **Calidad del punto impreso:** Es prioritario que el impacto del solenoide conforme puntos con la calidad adecuada, es decir, puntos semiesféricos y sin rotura del papel.
- **Solicitaciones del solenoide:** Las corrientes máximas y tiempos de funcionamiento del solenoide están relacionados directamente con las pérdidas y la velocidad de impresión.
- **Calentamiento de los solenoides:** El incremento de pérdidas se traduce en un aumento de temperatura, pudiendo ocasionar la rotura del solenoide.
- **Ruido de impresión:** Los niveles de ruido emitido durante la impresión han de ser mínimos sin penalizar la calidad del punto impreso.

La segunda parte de este estudio consiste en buscar y analizar diferentes alternativas para el accionamiento de los solenoides utilizados en las impresoras Braille de tipo impacto. Para ello, se realizará un primer análisis basado en simulación utilizando la herramienta comercial de simulación de circuitos eléctricos *PSIM*, comercializada por la empresa *Powersys*. Por último, se tratará de validar el análisis teórico mediante medidas experimentales sobre un prototipo a escala para un único



solenoides. Las distintas alternativas se compararán teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- **Velocidad de impresión:** El objetivo prioritario es conseguir una topología que permita aumentar la velocidad de impresión del solenoide. Para ello se tratarán de reducir los tiempos de recuperación del mismo.
- **Focos de calor:** Para un buen funcionamiento de las impresoras es aconsejable que no existan focos de calor concentrados, ya que supondrían el uso de elementos disipadores de calor por la placa y el consiguiente aumento de tamaño de la misma. Se analizará en cada alternativa dónde se encuentran los principales focos de calor.
- **Solicitaciones eléctricas de los semiconductores:** En todos los casos se analizarán las tensiones y corrientes máximas que deben soportar los semiconductores. Este apartado es básico para estimar coste y tamaño de la solución.
- **Complejidad de la solución:** El número de componentes que tenga cada propuesta definirá no solo el coste que supone dicha solución, sino la fiabilidad de la misma. Hay que tener en cuenta también la naturaleza de los componentes, ya que los componentes pasivos son más robustos que los activos. Por otra parte se buscará que el control de los accionadores sea lo más sencillo posible.

Además, se deberá tener en cuenta en todo momento el cumplimiento de las normativas eléctricas impuestas. Es decir, en todas las topologías propuestas para el accionamiento de los solenoides se debe cumplir el **reglamento electrotécnico de baja tensión**, que dicta que no se deben superar tensiones continuas mayores a 75 V, y la **normativa de seguridad eléctrica 60950N**, que impone que se deben emplear tensiones de alimentación inferiores a 50 V.



CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN



En este capítulo se comienza haciendo una breve introducción de la evolución histórica de la escritura en relieve desde sus orígenes hasta la actualidad. A continuación se explica brevemente en qué consiste el lenguaje Braille, dando a conocer la composición del carácter Braille. Posteriormente, se resumen los requisitos principales de las impresoras Braille y el funcionamiento básico de la impresora de tipo impacto. Tras esto, se realiza una descripción del solenoide, que es el elemento fundamental de la impresión. Finalmente se presenta un circuito accionador de solenoides empleado en un tipo de impresora Braille comercial.

2.1. ORÍGENES DE LA ESCRITURA EN RELIEVE

Al-Imam Al-Amadi, a mediados del siglo XIII, fue el primero en utilizar caracteres táctiles para la lectura. Al-Amadi era ciego y vendía libros en Arabia, por lo que para reconocer el título y el precio de cada libro, desarrolló caracteres en relieve que colocaba sobre el libro. Este fue el nacimiento de la lectura táctil.

Hasta 1784 no surgió la primera impresión en relieve sobre papel que posibilitara la lectura de invidentes. Fue desarrollada por el filósofo francés Valentín Haüy, quien desarrolló el primer método de impresión de libros para ciegos, que consistía en presionar una cartulina mojada sobre caracteres de gran tamaño hechos de plomo. Los libros resultantes eran enormes y muy pesados. Cada volumen pesaba alrededor de nueve kilos. Por otra parte su lectura era excesivamente lenta, debiendo recorrer con la yema del dedo cada carácter hasta reconocerlo y poder seguir con el siguiente, de forma que al final de una palabra difícilmente recordaban sus primeras letras. Por otra parte, el método de Valentín Haüy hacía posible la lectura, pero en ningún caso la escritura por parte de los ciegos.

Un avance cualitativamente importante fue la propuesta en 1808 del militar Charles Barbier, quien inventó un modo de escritura y lectura basado en puntos y rayas en relieve con el fin de que los soldados pudiesen descifrar por la noche consignas secretas (la llamó "escritura nocturna"), y lo presentó en el colegio de la Institución Real para Niños Ciegos de París donde se encontraba internado, contando pocos más de diez años, Louis Braille, que se había quedado ciego a los tres años.



El nuevo método se llamaba sonografía, y se basaba en diversas combinaciones de puntos y rayas formando signos que representaban los diferentes sonidos del lenguaje, no las letras del alfabeto. Para escribirlo se usaba una especie de regla con siete surcos poco profundos y una pinza que se deslizaba verticalmente siguiendo los renglones. En la pinza había una especie de ventanitas donde podían formarse los signos presionando con un punzón sobre la hoja de papel que se colocaba entre la pinza y la regla.

Sin embargo, la sonografía tenía problemas importantes: se trataba de un código basado en el sonido del lenguaje, pero no permitía el deletreo de las palabras, la acentuación de las vocales, los signos de puntuación de un texto, ni tampoco preveía la realización de operaciones matemáticas o la escritura de partituras musicales.

Fue Louis Braille quien adaptó el sistema de Barbier utilizando grupos de 1 a 6 puntos. Ya en 1932, la conferencia de Londres de educadores de invidentes estableció el modelo para los sistemas de puntos, adoptando un alfabeto conocido como *Standard English Braille*. Éste sistema es idéntico al Braille original, con algunas pequeñas modificaciones; y no solo se usa en todo el mundo angloparlante, ya que ha sido adaptado a la mayoría de las lenguas, incluido el chino.

Entre los primeros instrumentos que se diseñaron para esta escritura destaca la pizarra o pizarrón de surcos, que consistía en una hoja metálica o de madera labrada en forma de pequeños cuadrados. El papel se colocaba sobre la pizarra, y el lápiz, guiado por los surcos, marcaba un relieve sobre el papel, obteniéndose una caligrafía manual cuadrangular que se podía ver y tocar. Hoy en día se utilizan máquinas de escribir para comunicarse con las personas videntes, y pizarras para guiar al escritor en la formación de caracteres Braille. Además se dispone de la máquina de escribir Hall Braille, una modificación de la máquina de escribir normal, que crea caracteres Braille en el papel en lugar de imprimir en él caracteres visuales. [1] [2]

2.2. EL SISTEMA BRAILLE

Cuando tenía 15 años, el joven Louis Braille (1809-1852), quien a temprana edad había quedado ciego como consecuencia de un accidente, inventó un sistema de lectura y escritura por medio del tacto que consistía en puntos.

El Braille, un verdadero alfabeto, consiste en leer moviendo la mano de izquierda a derecha, pasando por cada línea. Los lectores de Braille pueden leer un promedio de 104 a 125 palabras por minuto, aunque algunos pueden alcanzar a leer 250 palabras por minuto utilizando ambas manos.

Mediante el Braille pueden representarse todas las letras y los signos de puntuación, los números, la grafía científica, los símbolos matemáticos y la música. Se trata de un sistema basado en un mecanismo absolutamente lógico que parte de 6 puntos en relieve perceptibles al tacto, organizados como una matriz de tres filas por dos columnas con los que se pueden obtener, en principio, 63 combinaciones diferentes. [2]

No obstante, con la introducción de la informática, el Braille ha sido ampliado a un código de 8 puntos, de tal manera que una letra individual puede ser codificada con una sola celda, pudiendo representar una celda cualquier carácter ASCII. Las 256 combinaciones posibles de los 8 puntos están codificadas según el estándar Unicode. [3]

En la *figura 2.1* está representado el alfabeto Braille básico, donde se observa que cada carácter está formado por una serie de puntos organizados en celdas de tres filas y dos columnas.

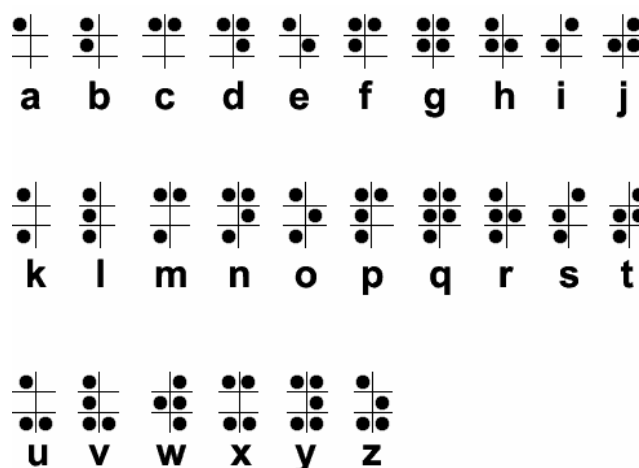


Figura 2.1. Alfabeto Braille básico

2.3. LA IMPRESORA BRAILLE DE TIPO IMPACTO

A lo largo de la historia han sido muchos los inventos desarrollados para tratar de mejorar la vida de las personas invidentes. A raíz de esta necesidad surgió la tiflotecnología, definida como “la adaptación y accesibilidad de las tecnologías de la información y comunicación para su utilización y aprovechamiento por parte de las personas con ceguera y deficiencia visual” [4]. Desde el punto de vista de la escritura Braille a nivel comercial, se ha pasado desde la primera máquina de escribir Hall Braille, totalmente mecanizada, hasta las actuales impresoras Braille de tipo impacto, controladas electromecánicamente. Sin duda, el desarrollo de la informática ha supuesto un gran avance en el campo de la tiflotecnología, permitiendo entre otras cosas el control eléctrico del funcionamiento de las impresoras Braille a través de un PC.

En la *figura 2.2* se observa un ejemplo de impresora Braille de tipo impacto comercial.

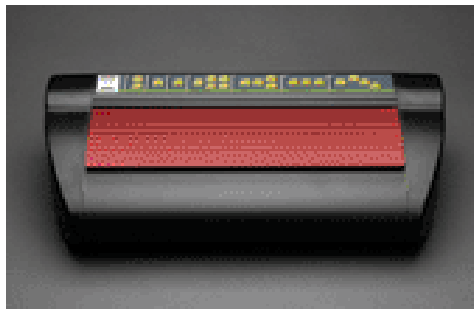


Figura 2.2. Impresora Braille de tipo Impacto

En la actualidad, la mayoría de las impresoras Braille comercializadas basan su funcionamiento en el mismo mecanismo, es decir, un conjunto de elementos electro-mecánicos capaces de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, formando de este modo los puntos que conforman cada carácter Braille. De aquí la denominación de “impresoras de tipo impacto”.

A continuación se detallan brevemente los principales requisitos que han de tener las impresoras Braille:

- **Alta producción:** Debe ser capaz de imprimir una gran cantidad de páginas y documentos en el menor tiempo posible, es decir, ha de ser veloz. Actualmente

hay varios modelos de impresoras. Por una parte existen modelos personales, que imprimen con mayor lentitud (aproximadamente 14 caracteres por segundo), y por otra parte modelos profesionales, con velocidades cercanas a los 250 caracteres por segundo (aproximadamente 800 páginas por hora).

- **Alta calidad Braille:** La calidad del punto ha de ser máxima, consiguiendo una forma lo más redondeada posible y sin llegar a la perforación del papel. Es decir, se debe lograr una fácil percepción táctil.
- **Alta fiabilidad y repetitividad:** La calidad de impresión ha de mantenerse constante durante toda la vida útil de la impresora.
- **Mínimo mantenimiento:** El mantenimiento del equipo se ha de realizar de manera rápida y sencilla.
- **Máxima portabilidad:** Debe permitir la gestión e impresión de documentos desde cualquier sistema operativo.

Una impresora Braille de tipo impacto está constituida por una serie de matrices de solenoides (ver *figura 2.3*) que al recibir un pulso eléctrico activan los correspondientes solenoides en cada instante. Estos golpean sobre un papel especial, de un grosor mayor que el normal (entre 100-175 gr/m²), impactando de tal manera que se forma un punto sin llegar a perforarlo. El ciclo se cierra con un retorno de carro, haciendo volver a las matrices a su posición inicial y desplazando el papel hacia abajo para comenzar la impresión de una nueva línea.

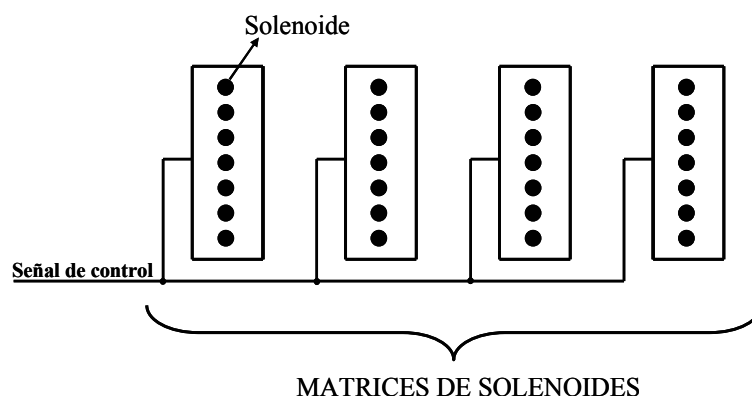


Figura 2.3. Funcionamiento de la impresora Braille de tipo impacto



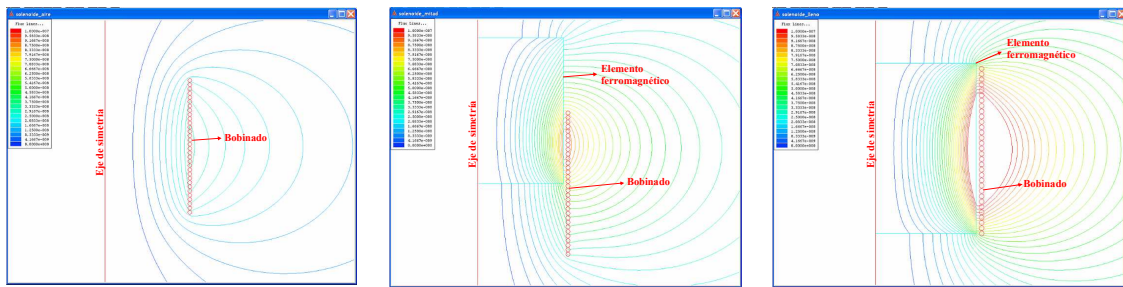
La conformación del punto se consigue por el impacto del perno hembra que se encuentra en el extremo del vástago de cada solenoide, sobre una placa complementaria (macho) produciendo de este modo el relieve sobre el papel.

2.3.1. EL SOLENOIDE

El solenoide o martillo electro-mecánico es el elemento metálico básico en una impresora Braille de tipo impacto, ya que es el encargado de generar el impacto que conforma el punto por impresión. Las partes básicas de este componente son el encapsulado metálico y el vástago, que se mueve linealmente dentro del encapsulado. Además dispone de unos terminales de control y de un muelle que se encarga de hacer retroceder el vástago hasta su posición inicial después del impacto.

El solenoide se controla eléctricamente mediante una tensión o una corriente aplicada sobre sus terminales, de forma que al hacer circular una corriente eléctrica por el mismo se induce una corriente magnética (proceso de magnetización) que se encarga de desplazar el vástago. Este vástago tiene además la particularidad de estar hecho de un material ferromagnético, por lo que durante su desplazamiento provoca una variación de la inductancia del solenoide debido a la distorsión del campo magnético generado en su interior.

Se ha simulado el efecto de introducir un elemento ferromagnético en el interior de una bobina utilizando la herramienta de simulación de elementos finitos *Maxwell*. En la *figura 2.4* se ilustra como varía la concentración de las líneas de campo al introducir el elemento ferromagnético en el interior del solenoide. La línea roja representa el eje de simetría del solenoide, y los círculos rojos forman el bobinado. En la *figura 2.4a* el solenoide tiene aire en su interior, por lo que la densidad de las líneas de campo en este caso es baja. Sin embargo, en la *figura 2.4b* y la *figura 2.4c* se puede apreciar cómo aumenta la concentración de las líneas de campo en el interior de la bobina durante el recorrido del elemento ferromagnético. Ésta es mucho mayor en la *figura 2.4c*, donde el componente está totalmente introducido en el solenoide.



a. Campo magnético en el interior de un solenoide vacío

b. Campo magnético en el interior de un solenoide con un elemento ferromagnético introducido hasta la mitad.

c. Campo magnético en el interior de un solenoide con un elemento ferromagnético introducido completamente.

Figura 2.4. Líneas de campo magnético por el solenoide al introducir un elemento ferromagnético en su interior

Tras el instante del impacto, se produce el retroceso del vástago hasta su posición inicial mediante un muelle destinado para ello. Por otra parte, la desmagnetización de la bobina se consigue aplicando una tensión inversa en sus terminales de control.

En resumen, el comportamiento eléctrico del solenoide es el de una inductancia variable en función de la posición del vástago.

2.3.2. EL ACCIONADOR DE LOS SOLENOIDES

Uno de los circuitos de accionamiento del solenoide empleado en las impresoras Braille de tipo impacto es el que se representa en la *figura 2.5a*. Dicha topología consiste en un interruptor y un diodo colocado en antiparalelo con el solenoide para permitir su desmagnetización. Las principales ventajas de esta topología son su robustez y bajo coste, debido principalmente al reducido número de componentes que la forman y la facilidad que supone el control del solenoide, ya que solo existe un interruptor que está referido a tierra.

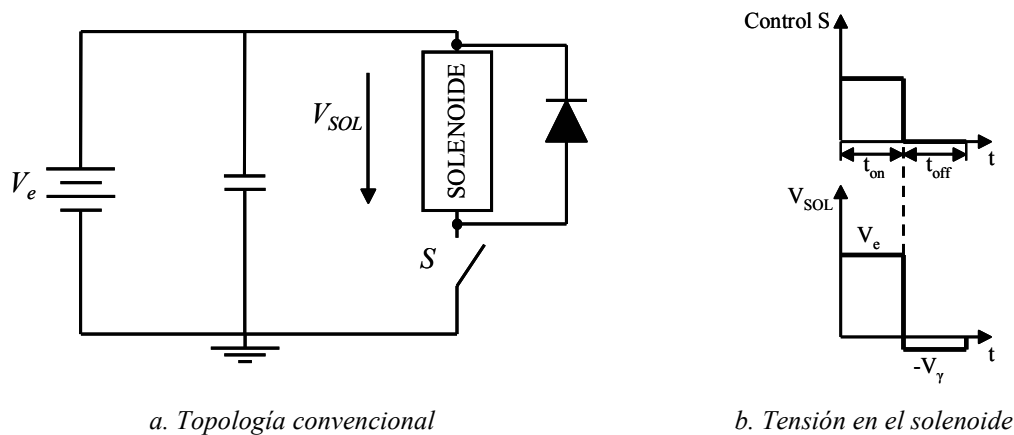


Figura 2.5. Gobierno en modo tensión del solenoide. Configuración original

En la *figura 2.5b* se pueden observar las tensiones aplicadas al solenoide durante su funcionamiento. Mientras el interruptor S está cerrado (t_{on}), la tensión aplicada al solenoide (V_{Sol}) es la tensión de entrada (V_e) y durante el tiempo de apagado del interruptor (t_{off}), la tensión aplicada es la tensión de caída directa del diodo (V_γ).

Se dispone de las condiciones de funcionamiento de una impresora Braille comercial, cuya fuente de alimentación es de 24 V y el disparo de control tiene una duración de 1,26 ms. En la *figura 2.6* se muestra el resultado de aplicar las condiciones de funcionamiento descritas sobre el circuito accionador de la *figura 2.5a*. En primer lugar, se observa que la pendiente con la que crece la corriente por la bobina es variable. Esto se debe a que, como se comentó anteriormente, el solenoide se comporta como una inductancia variable en función de la posición del vástago. Como la pendiente de subida de la corriente por el solenoide viene dada por la expresión Ve/L , al variar L también varía la pendiente. Por otra parte, se aprecia que la desmagnetización del solenoide es un proceso muy lento en comparación con el proceso de magnetización (4 ms frente a 1,26 ms). La diferencia tan grande de tiempos entre ambos procesos viene dada por las tensiones que se aplican al solenoide en cada instante. El proceso de magnetización se realiza aplicando la tensión de entrada (24 V) sobre el solenoide, mientras que durante la desmagnetización la tensión aplicada es una tensión inversa mucho inferior, de valor V_γ (0,7 V).

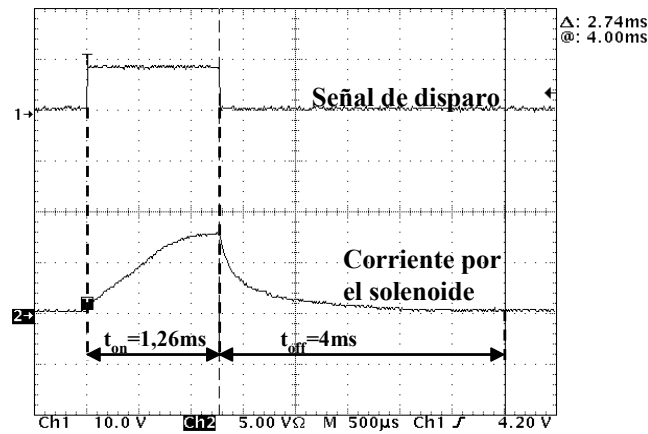


Figura 2.6. Corriente por el solenoide en condiciones de funcionamiento comúnmente utilizadas en impresoras Braille

A la vista del elevado tiempo de desmagnetización observado en la figura 2.6 en comparación con el tiempo de magnetización (t_{on}), se plantea la necesidad de emplear nuevas topologías eléctricas para el gobierno del solenoide que consigan reducir los tiempos de desmagnetización (t_{off}), aumentando de este modo la velocidad de impresión de las impresoras Braille.



CAPÍTULO 3

ESTUDIO DEL SOLENOIDE

En el presente capítulo se analiza el comportamiento del solenoide desde diferentes aspectos (solicitaciones eléctricas, calidad del punto, ruido de impresión y calentamiento). Para ello se comienza realizando un análisis de la caracterización eléctrica del solenoide. Tras una descripción detallada del sistema de control empleado para la realización de las siguientes pruebas, se comparan los resultados obtenidos al completar una serie de ensayos utilizando diferentes condiciones de funcionamiento.

3.1. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL SOLENOIDE

El solenoide es un dispositivo que consta de un elemento móvil y otro fijo. El elemento móvil es un vástago que se mueve al aplicar una tensión o corriente entre los terminales de la bobina que compone la parte fija. El vástago, al desplazarse, impacta sobre una matriz produciendo en el papel lo que se denomina *un punto* que conforma el carácter que se desea imprimir. Este punto debe tener una profundidad y forma adecuada, sin que se produzca en ningún momento la perforación del papel, para permitir una correcta lectura por parte del usuario.

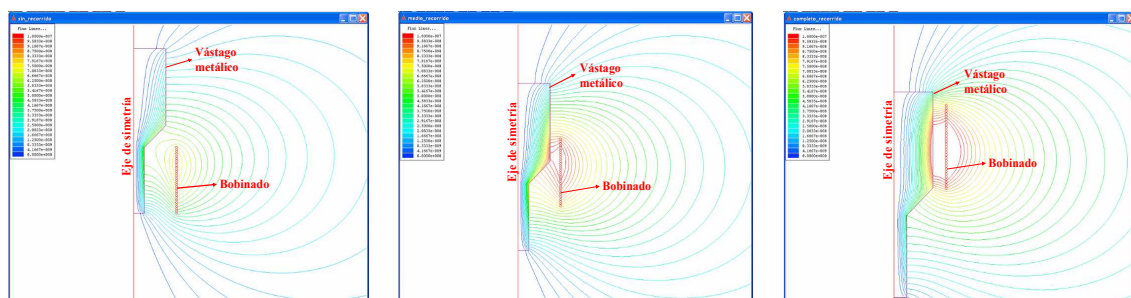
Los elementos constructivos del solenoide se muestran en la *figura 3.1*, donde se pueden apreciar la cobertura del solenoide, el arrollamiento de la bobina que lo compone y el vástago. Aparte de estos componentes, existe un muelle que se encarga de hacer retroceder el vástago cada vez que se produce el impacto.



Figura 3.1. Elementos de un solenoide

El movimiento del vástago se produce al hacer circular una corriente por la bobina, que induce un campo magnético en el interior de la misma generando una fuerza que es capaz de moverlo.

Para representar el funcionamiento básico del solenoide se ha utilizado la herramienta de elementos finitos *Maxwell*. La *figura 3.2* ilustra la variación del campo magnético durante el recorrido del vástago metálico. Esta figura consiste en un corte transversal del solenoide, en el que la línea roja representa el eje de simetría y los círculos rojos el bobinado. En la *figura 3.2a* se representa la situación en la que el vástago está situado dentro del solenoide. En este caso, la parte más estrecha del vástago está en el interior del solenoide, por lo que la concentración de líneas de campo es mínima. En cambio, a medida que el vástago va saliendo del encapsulado (*figura 3.2b* y *figura 3.2c*), la cantidad de material ferromagnético introducida en el solenoide es mayor. Por lo tanto, al salir el vástago aumenta la densidad de flujo magnético, incrementando el valor de la inductancia. Por otra parte, el propio movimiento del vástago induce unas corrientes parásitas en el material metálico, que son las que generan las pérdidas.



a. Campo magnético en el interior del solenoide en reposo

b. Campo magnético en el interior de un solenoide con el vástago a medio recorrido

c. Campo magnético en el interior de un solenoide con el vástago en su máximo recorrido

Figura 3.2. Líneas de campo magnético en el solenoide al introducir el vástago metálico

En el presente proyecto se pretenden comparar dos tipos de solenoides utilizados en impresoras Braille de tipo impacto comerciales: solenoides de impresoras personales (TIPO A) y solenoides de impresoras industriales (TIPO B). Ambos tipos de solenoides se representan en la *figura 3.3*.

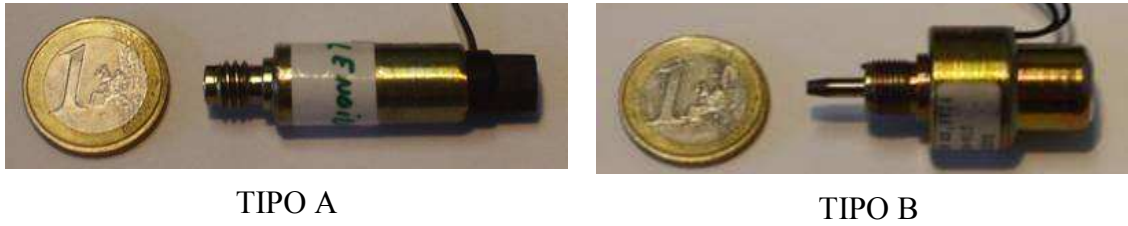


Figura 3.3. Tipos de solenoide

Se ha realizado una medida de la impedancia que presenta cada solenoide en el rango de frecuencias próximas al punto de funcionamiento ($f_{\text{funcionamiento}}=30,30$ Hz). Para realizar estas medidas se ha empleado un analizador de impedancias. Se observa en la *tabla 3.1* que el valor de la resistencia e inductancia de ambos solenoides es del mismo orden de magnitud.

Tabla 3.1. Medida de la impedancia de los solenoides a $f=100$ Hz. Mínimo recorrido del vástago

Solenoide	Resistencia (Ω)	Inductancia (mH)
Tipo A	2,39	2,05
Tipo B	2,5	1,46

Por otra parte, se ha estudiado la repetitividad de las características de los solenoides, midiendo el valor de la impedancia con diferentes solenoides de cada uno de los tipos analizados. Además, se ha analizado cómo afecta el movimiento del vástago al valor de la inductancia del solenoide. De los resultados de la *tabla 3.2.* y *tabla 3.3.* se puede concluir que todos los solenoides presentan un comportamiento muy parecido y que el valor de la inductancia aumenta al desplazarse el vástago.

Tabla 3.2. Medida de la impedancia del solenoide a $f=100$ Hz . Mínimo recorrido del vástago

Solenoide	Resistencia (Ω)	Inductancia (mH)
Tipo A1	2,64	1,94
Tipo A2	2,41	1,91
Tipo B1	2,62	1,46
Tipo B2	2,5	1,46

Tabla 3.3. Medida de la impedancia del solenoide a $f=100$ Hz. Máximo recorrido del vástago

Solenoide	Resistencia (Ω)	Inductancia (mH)
Tipo A1	3,396	5,1
Tipo B1	2,46	2,46

El siguiente estudio realizado consiste en determinar qué valor de tensión de entrada y qué duración del tiempo de disparo es el adecuado para obtener un impacto óptimo. Para ello se han completado una serie de ensayos variando la tensión de entrada con diferentes tiempos de activación (t_{on}), poniendo como límite de estos tiempos 2 ms. La razón de imponer esta limitación es que uno de los objetivos es aumentar las velocidades de impresión y para ello los tiempos no deben ser excesivos.

La topología empleada para el accionamiento del solenoide en los ensayos acerca de la caracterización del solenoide consiste en un convertidor CC-CC elevador como el representado en la *figura 3.8*.

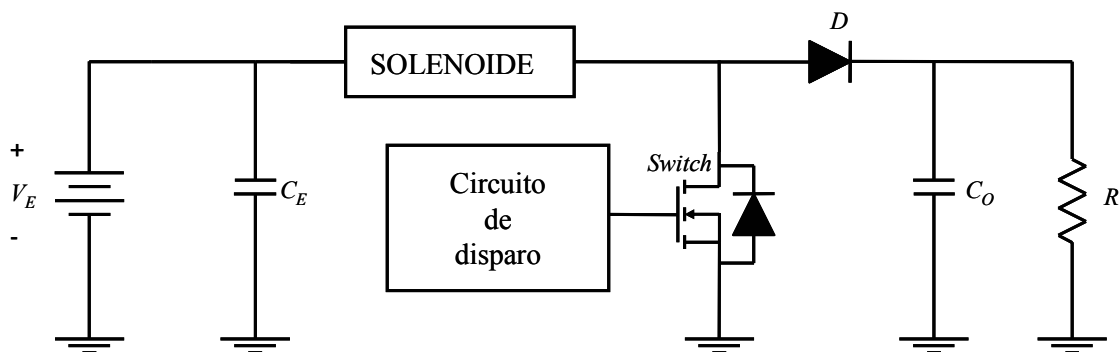


Figura 3.4. Topología elevadora empleada para la realización de ensayos con los solenoides

Por otra parte, en la *figura 3.5* se muestra el banco de pruebas en el que se realizan todas las pruebas de impresión por impacto sobre el papel. Dicho banco está construido en su mayor parte de acero y permite la fijación de distintos tipos de solenoides. Los terminales del solenoide están accesibles para poder conectarlos a los distintos accionadores. Además, permite regular la distancia a la que se debe colocar cada solenoide. Las pruebas que permite hacer el banco de ensayos consisten en introducir un papel en la matriz de impresión, de manera que al impactar el perno

hembra del vástago sobre esta placa complementaria (macho), se produce el relieve sobre el papel.

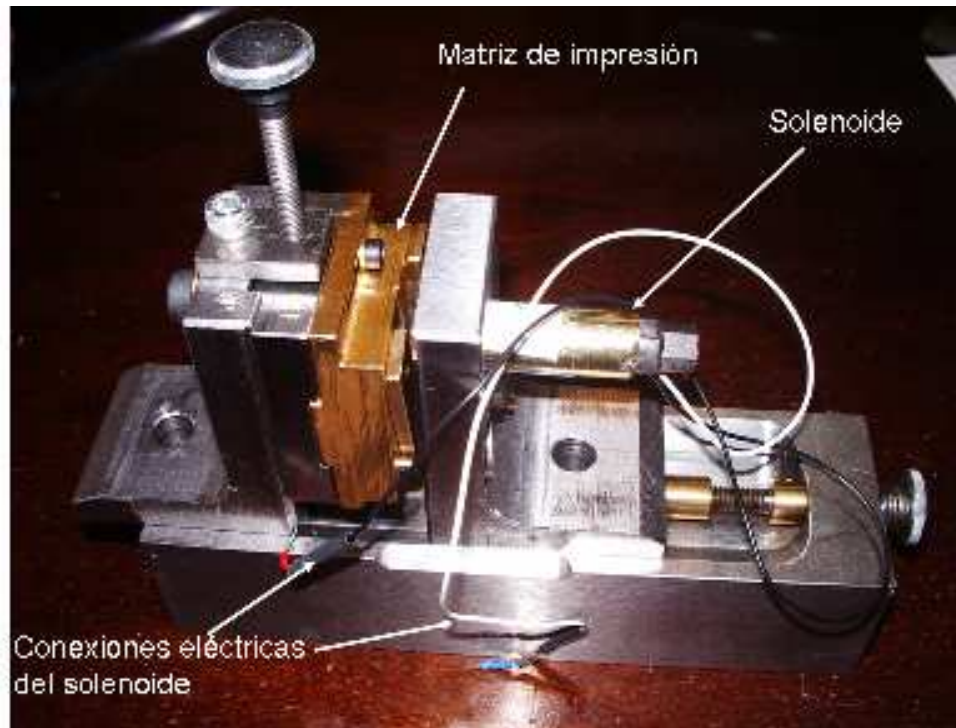
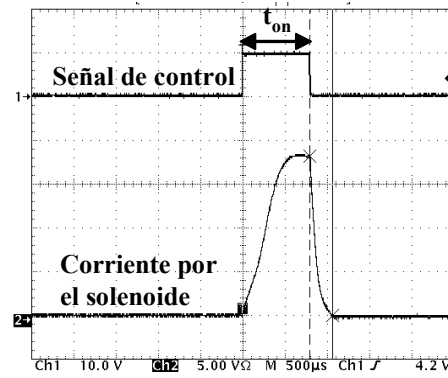
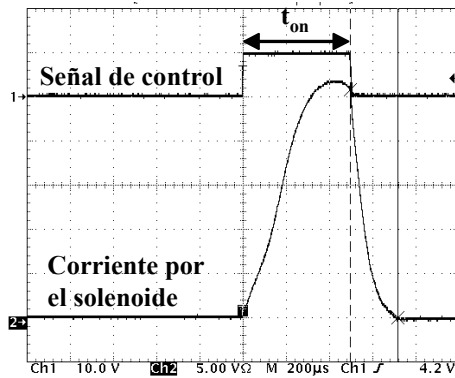
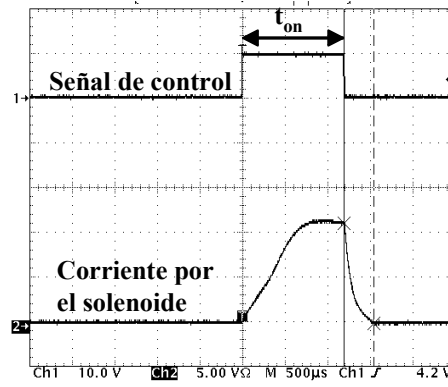
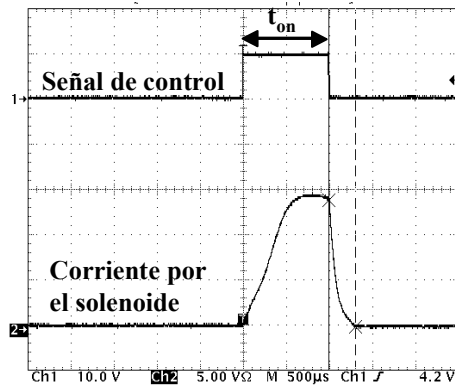


Figura 3.5. Banco de pruebas

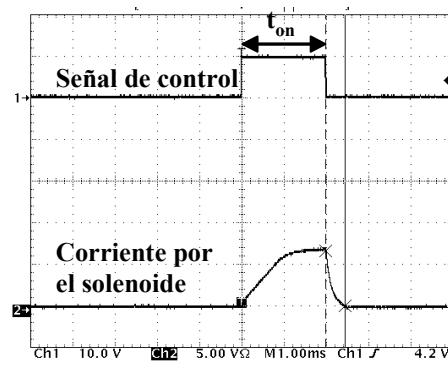
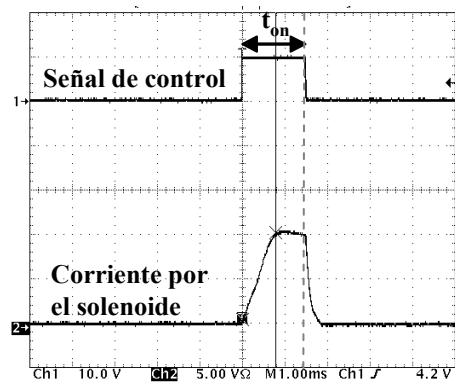
En la *figura 3.6.* se recogen las formas de corriente obtenidas en los diferentes ensayos realizados con el *solenoides tipo A*. En ellas se observan las corrientes máximas y los tiempos de activación (t_{on}) necesarios para obtener el punto adecuado con diferentes tensiones de alimentación. Teniendo en cuenta que los valores de resistencia e inductancia del *solenoides tipo B* son parecidos a los del *solenoides tipo A*, se estima que los resultados obtenidos al realizar las mismas pruebas con ambos solenoides son similares. En consecuencia, se omite la realización de dichos ensayos con el *solenoides tipo B*.



a. $V_E=85\text{ V}$. $t_{on}=0,5\text{ ms}$. $t_{off}=0,22\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=27,5\text{ A}$ b. $V_E=51\text{ V}$. $t_{on}=0,8\text{ ms}$. $t_{off}=0,28\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=18,9\text{ A}$



c. $V_E=40\text{ V}$. $t_{on}=1\text{ ms}$. $t_{off}=0,3\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=14\text{ A}$ d. $V_E=31\text{ V}$. $t_{on}=1,2\text{ ms}$. $t_{off}=0,35\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=11,9\text{ A}$



e. $V_E=29\text{ V}$. $t_{on}=1,5\text{ ms}$. $t_{off}=0,38\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=11,1\text{ A}$ f. $V_E=18\text{ V}$. $t_{on}=2\text{ ms}$. $t_{off}=0,463\text{ ms}$ $I_{sol,MAX}=7,5\text{ A}$

Figura 3.6. Formas de corriente en el solenoide aplicando un pulso único. Solenoide Tipo A. $f=1\text{ Hz}$

Se observa que la tensión de entrada se incrementa a medida que el tiempo de encendido es menor. Además, comparando la topología elevadora con la convencional (formada por un diodo en antiparalelo con el solenoide para la desmagnetización del mismo), se puede concluir que el valor del tiempo de desmagnetización (t_{off}) se ha reducido notablemente respecto a las condiciones de partida (de 4 ms a tiempos inferiores a 0,5 ms), siendo ahora un tiempo incluso menor que el tiempo de encendido. Esto es debido a que la tensión de desmagnetización aplicada sobre el solenoide es mayor al utilizar la topología elevadora. Según la limitación impuesta de tiempos, para un pulso de 2 ms de duración máxima, la tensión aplicada al solenoide para conseguir un punto adecuado sería de 18 V. Para estas condiciones de funcionamiento, se puede observar en la *figura 3.6f* que el tiempo de desmagnetización es de 0,463 ms. Es decir, en las condiciones más desfavorables en cuanto a la velocidad de impresión, los tiempos de desmagnetización con la topología elevadora no van a superar los 0,5 ms.

De los resultados obtenidos tras los ensayos realizados, se extrae como conclusión principal que todos los casos poseen una característica común: **el área encerrada por la corriente es aproximadamente la misma**. Este área corresponde a la cantidad de carga (Q) utilizada por el solenoide para lograr el impacto, y viene dada por la expresión:

$$Q = \int_0^{t_{on}} i(t) \cdot dt \quad (3.1)$$

Por lo tanto, para obtener un punto adecuado la cantidad de carga almacenada por la bobina debe ser una determinada, y cuyo valor depende del solenoide, tal como se mostrará posteriormente.

A la hora de seleccionar el tiempo de encendido más adecuado hay que establecer un compromiso entre velocidad de impresión y el calentamiento del solenoide. Desde el punto de vista de la velocidad de impresión lo que interesa es minimizar el tiempo de magnetización, t_{on} . Esto implica mayores tensiones de entrada. No obstante, el incremento de la tensión de entrada supone mayores pérdidas, ya que partiendo de que la corriente media viene dada por la expresión:

$$I_{media} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} i(t) dt + \int_{t_{on}}^{t_{off}} i(t) dt \right] \quad (3.2)$$

T en este caso es el periodo de funcionamiento del solenoide. Considerando que la frecuencia con la que se han realizado estos ensayos es de 1 Hz, el valor de T en este caso es de 1 s.

Si se considera despreciable el tiempo de desmagnetización, la expresión se simplifica:

$$I_{media} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} i(t) dt \right] \quad (3.3)$$

Comparando esta expresión con la de la cantidad de carga, ambas se relacionan de este modo:

$$I_{media} = \frac{Q}{T} \quad (3.4)$$

De esta manera, como tanto el periodo de funcionamiento del solenoide como la carga necesaria para obtener el impacto adecuado son constantes, la corriente media también lo es. Teniendo en cuenta que la potencia media (P_{media}) disipada en el solenoide viene dada por la expresión:

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} u(t) \cdot i(t) \cdot dt = V_E \cdot \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} i(t) \cdot dt = V_E \cdot I_{media} \quad (3.5)$$

El aumento de la tensión de entrada implica mayores pérdidas y por lo tanto un mayor incremento de temperatura en el solenoide.

A su vez, la tensión de entrada tiene restringido su valor por el reglamento de baja tensión, que dicta que no se deben superar tensiones continuas superiores a 75 V, y por la normativa de seguridad eléctrica 60950N, que impone que se deben emplear tensiones inferiores a 50 V.

3.2. TÉCNICAS PARA EL CONTROL DEL SOLENOIDE

Con el fin de conseguir los mejores resultados en cuanto a calidad de impresión, calentamiento de los solenoides y ruido de impresión producidos durante el funcionamiento de los solenoides, se analizan diferentes métodos de control que controlan el movimiento y por lo tanto el impacto del vástago sobre el papel. Para ello

se ha implementado por una parte la técnica de control consistente en **pulso único** y por otra parte **tres técnicas multipulso** que **buscan como objetivo la impresión del punto por presión del vástago sobre el papel en lugar de por simple impacto.**

Las técnicas multipulso consisten en dividir el pulso de disparo en dos intervalos de tiempo. Durante el primer intervalo el solenoide obtiene la energía necesaria para conseguir el acercamiento del vástago al papel y durante el segundo intervalo se produce la impresión del punto.

Para saber cuál es la energía necesaria para conseguir el acercamiento del vástago al papel, se ha aplicado al solenoide un pulso único de tensión con un ancho de 1 ms. Mediante este ensayo se ha determinado para qué valores de tensión el vástago se acerca al máximo al papel sin llegar a impactar.

Las técnicas multipulso analizadas son tres, y se diferencian entre ellas únicamente en el segundo intervalo de tiempo, que corresponde al impacto del vástago sobre el papel.

A continuación se explica brevemente en qué consiste cada una de las técnicas multipulso (ver secuencias de disparo de las tres técnicas en *Anexo 2*).

• **TÉCNICA DE MULTIPULSO 1**

La forma de disparo usada en este primer modo de gobierno de pulso múltiple está conformada por un primer pulso de tiempo adecuado para conseguir la mitad de la corriente máxima por la bobina (el valor de corriente máxima es el obtenido al aplicar la técnica de pulso único), seguido de un tren de pulsos más cortos con los que se logra mantener la corriente en este nivel, hasta que se consigue el acercamiento del vástago al papel, instante en el que se aplica un último pulso con la energía necesaria para la impresión del punto.

En la *figura 3.7* se observa la forma de corriente que circula por el *solenoide tipo A* al aplicar la secuencia de control de multipulso 1 sobre el interruptor de la topología elevadora (*figura 3.4*), con la que se han realizado los ensayos.

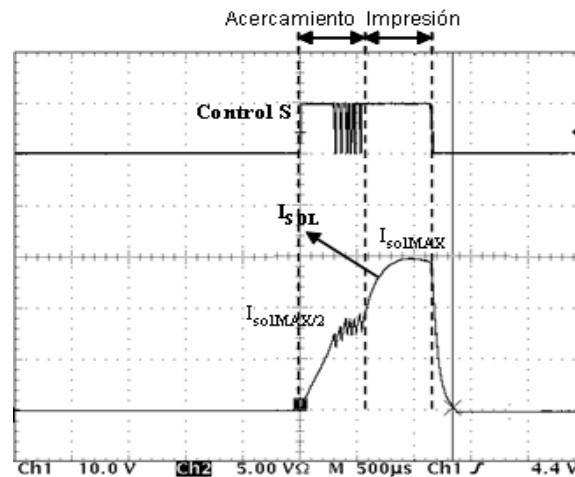


Figura 3.7. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 1

• TÉCNICA DE MULTIPULSO 2

La siguiente forma de disparo es similar a la anterior, con la diferencia de que el tramo destinado a la impresión está subdividido en tres partes. La división de este segundo tramo en varios pulsos tiene como objetivo la eliminación de la inercia mecánica del vástago, con lo que se conseguiría reducir el ruido generado durante el momento del impacto.

En la *figura 3.8* se representan la señal de control y la corriente del solenoide al aplicar la técnica de disparo de multipulso descrita en el interruptor de la topología elevadora (*figura 3.4*).

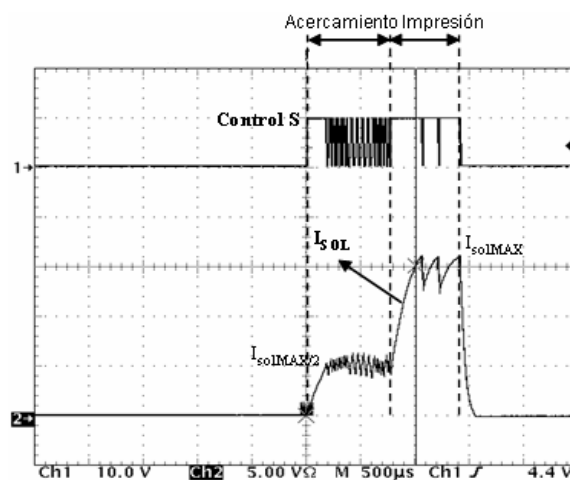


Figura 3.8. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 2

• TÉCNICA DE MULTIPULSO 3

La última forma de disparo consistente en un multipulso, es parecida a las dos anteriores, con la particularidad de que el periodo de impacto está subdividido en dos tramos. En primer lugar un pulso más ancho y a continuación un tren de pulsos más estrechos, encargados de mantener la corriente en el nivel máximo hasta que se conforme el punto.

El resultado de aplicar la técnica de control de multipulso 3 al interruptor de la topología elevadora (*figura 3.4*) se puede observar en la *figura 3.9*.

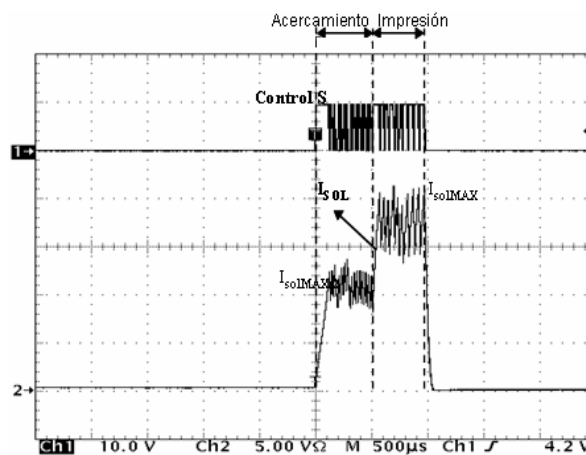


Figura 3.9. Forma de corriente por el solenoide al aplicar la técnica de control de multipulso 3

3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL

La topología empleada para el gobierno de los solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto, con la que se trata de analizar el comportamiento de los solenoides, es el convertidor CC-CC elevador mostrado en la *figura 3.4*, donde el circuito de disparo es el encargado de controlar el impacto mecánico del vástago. La generación de las señales de control requiere fundamentalmente:

- **Gran precisión**, sobretodo para la conformación de los trenes de pulsos que controlan la técnica de disparo multipulso.

- Un **sistema de control flexible**, que permita hacer pruebas con diferentes trenes de pulsos para optimizar el patrón de disparo, variando el ancho de los mismos, la frecuencia, etc.

Existen diversas plataformas basadas en microprocesadores que podrían haberse utilizado en esta aplicación. Sin embargo, dado lo sencillo que resulta este diseño al basarse en bloques digitales, se ha seleccionado como herramienta para la realización de esta tarea una tarjeta programable modelo *Spartan-3 Starter Kit* de la marca *Xilinx* (figura 3.10), que incorpora una *FPGA XC 3S200*, de 200000 puertas equivalentes. Además, es capaz de conseguir pulsos con un ancho mínimo de 20 ns gracias a su reloj interno de 50 MHz. Considerando que los máximos requerimientos de tiempos de encendido y apagado de los trenes de pulsos se encuentran en el orden de milisegundos, la precisión que se obtiene con dicha tarjeta programable es suficientemente buena.

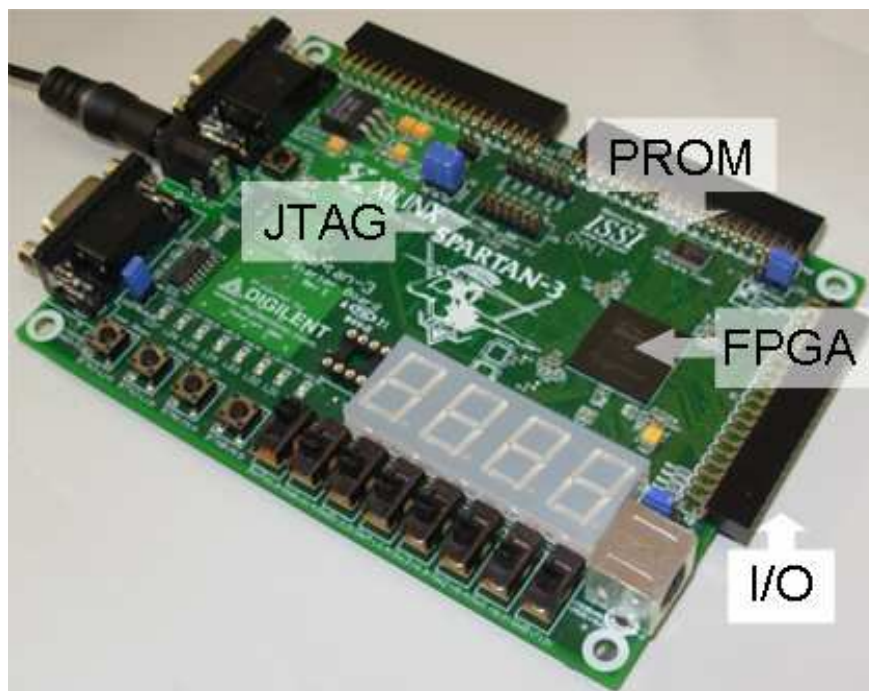


Figura 3.10. *Spartan-3 Starter Kit* de Xilinx

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El diagrama de bloques que describe el funcionamiento del sistema es el que se muestra en la figura 3.11. Los elementos *hardware* que aparecen en este sistema son:

- El **convertidor CC-CC elevador**, donde está conectado el solenoide.
- La **tarjeta programable Spartan-3 Starter Kit** con la **FPGA**, que es la encargada de aplicar la señal de control sobre el interruptor del convertidor elevador.
- El **PC**, encargado de programar el sistema digital sobre la FPGA a través del interfaz JTAG.

En el ordenador se han utilizado las herramientas propias del desarrollo en VHDL (*Modelsim* para simular y la herramienta de *Xilinx Project Navigator* para programar la FPGA) y otras herramientas (*Excel*) para calcular los parámetros de configuración del sistema.

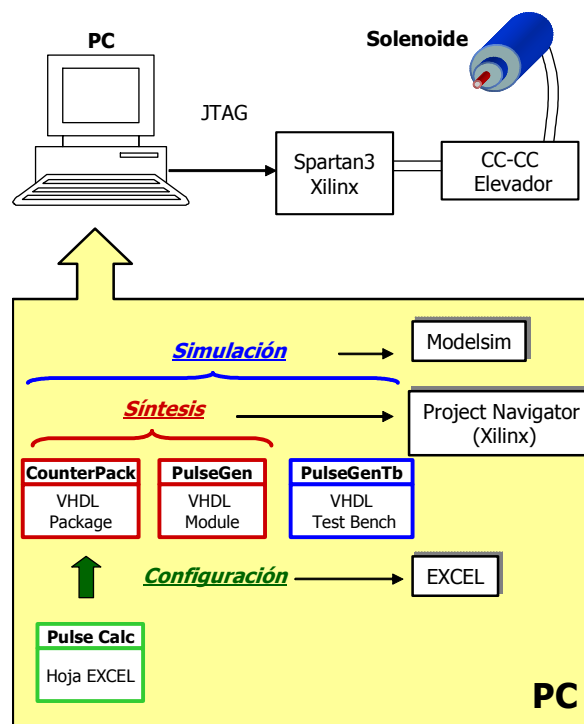


Figura 3.11. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control

El sistema digital de control ha sido descrito en lenguaje VHDL, a través de tres ficheros:

- Un paquete de constantes ("*counterpack*"), que contiene todas las constantes de configuración y que sirve exclusivamente para parametrizar el sistema.
- Un módulo VHDL, donde se encuentra la descripción del sistema de control. Este módulo está parametrizado a través del *counterpack*.

- Finalmente, un fichero que hace la función de banco de pruebas (“*testbench*”), y que se encarga de generar los estímulos necesarios para la simulación del sistema.

Los dos primeros ficheros son los que se sintetizan e implementan finalmente en la FPGA.

Para definir los parámetros de configuración de cada uno de los bloques digitales que conforman la señal de control, se ha creado una sencilla hoja de cálculo en *Excel*. Esta hoja de cálculo proporciona los valores de dichos parámetros medidos en ciclos de reloj, en función de las características temporales de la secuencia y de la frecuencia de reloj que se esté utilizando (casillas con fondo amarillo en la *figura 3.12*). Una vez obtenidos los parámetros, se introducen en el fichero de configuración “*counterpack*”, y se realiza el proceso de síntesis del circuito digital descrito en los ficheros VHDL mediante la herramienta *Xilinx Project Navigator*. Finalmente se programa la FPGA a través del interfaz JTAG.

No obstante, el proceso de cálculo de parámetros y programación solo se ha de repetir cada vez que se modifica el tren de pulsos, ya que la tarjeta utilizada incluye una memoria PROM que guarda la configuración de la FPGA, permitiendo que el sistema no se borre cada vez que se interrumpe la alimentación (hace que sea un sistema no volátil).

Para asegurar que la secuencia de control correspondiente a cada técnica de disparo sea correcta, se ha realizado una simulación del código VHDL antes de programar la FPGA. Para ello se ha utilizado la herramienta *Modelsim*, que permite observar si los resultados son los esperados.

Se ha de tener en cuenta que el sistema descrito tiene sentido para técnicas de prototipado rápido, no superando los dos minutos desde que se introducen los nuevos parámetros en el *counterpack* hasta que el *Xilinx Project Navigator* reprograma la FPGA. Sin embargo, el uso de una FPGA no tiene sentido para implementar el sistema real, ya que supone un elevado coste.

CONSTANTES PARA LA GENERACIÓN DE LOS PULSOS. TÉCNICA MULTIPULSOS 1.

Datos de la FPGA

Frecuencia reloj FPGA 50 MHz

Datos del tren de pulsos

Nº de secuencias 3000
Período de repetición de la secuencia 200 ms
Tiempo de activación 0,25 ms
Tiempo de acercamiento 0,95 ms
Acercamiento-activación 0,7 ms
Nº de pulsos del segundo tren 19
Tiempo on de cada pulso del segundo tren 26,3 us
Tiempo off de cada pulso del segundo tren 10,02 us
Tiempo de impacto 0,97 ms

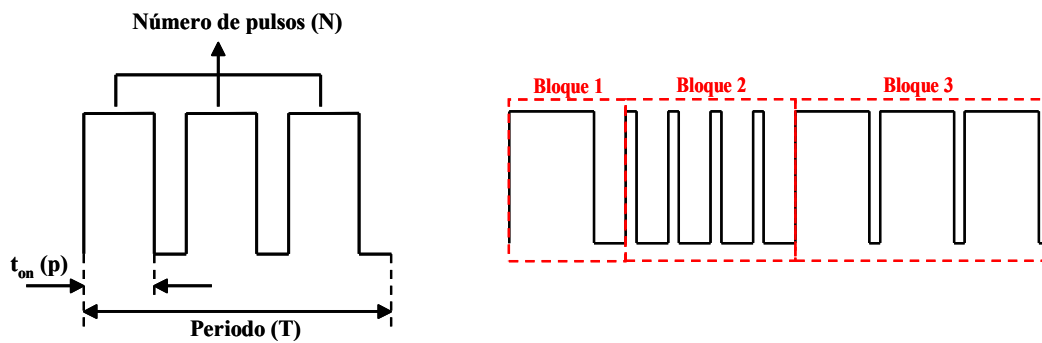
Datos para introducir en el CounterPack

Nsecuencia	3000	
Tsecuencia	10000000	ciclos de reloj
Np1	1	
Tp1	13001	ciclos de reloj
p1	12500	ciclos de reloj
Np2	19	
Tp2	1816	ciclos de reloj
p2	1315	ciclos de reloj
Np3	1	
Tp3	48500	ciclos de reloj
p3	48500	ciclos de reloj
cycle	20	ns

Figura 3.12. Hoja de cálculo para la obtención de los parámetros del circuito de control digital

3.3.2. DESCRIPCIÓN DE LA SECUENCIA DE CONTROL

La generación de los pulsos de disparo para el control del solenoide es diferente en función de la técnica de disparo utilizada, pero todas ellas tienen una característica común, que es la formación de las señales de disparo a través de la unión de varios bloques de trenes de pulsos. Los parámetros que definen cada bloque son el periodo del mismo, el número de pulsos que lo forman y el tiempo de encendido de cada pulso (ver *figura 3.13a*). De esta forma queda definida la frecuencia de cada tren de pulsos, formando un tren de pulsos completo como el que se muestra en la *figura 3.13b*.



a. Parámetros característicos de cada bloque

b. Tren de pulsos completo

Figura 3.13. Formación de la señal de control completa

El diagrama de bloques del sistema digital es el descrito en la figura 3.14. En este caso aparece el sistema para generar trenes de pulsos con tres tipos de pulso diferentes, aunque llegarán a ser de hasta cuatro tipos de pulso diferente en función de la técnica de disparo empleada.

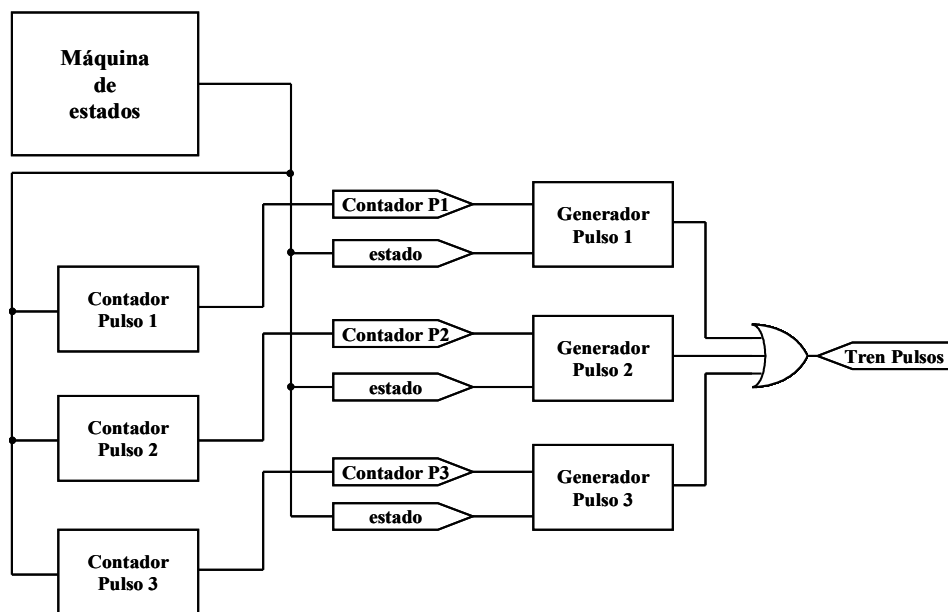


Figura 3.14. Diagrama de bloques básico del sistema de generación de pulsos

Una máquina de estados se encarga de definir en cada instante el bloque o tren de pulsos que hay que generar para conformar la señal de control completa (ver figura 3.13b). Además, define el tiempo que dura el ensayo. De esta manera, se facilita la realización de los ensayos térmicos largos (varios minutos) sin tener que cronometrar el tiempo externamente, ya que el propio sistema de control se encarga de avisar del fin de la prueba.

Para cada bloque de pulsos (bloques 1, 2 y 3 en la *figura 3.13b*) se define un contador de pulsos y un generador de pulso. Por una parte, el contador de pulsos se encarga de contabilizar el número de pulsos transcurridos en cada bloque, habilitándose el cambio de bloque cuando se alcanza el número de pulsos definido previamente en el *counterpack* para ese bloque. Por otra parte, el generador de pulso tiene la misión de conformar el ancho de cada pulso de ese bloque, definido anteriormente del mismo modo que el número de pulsos.

Cada contador y cada generador de pulsos se activan solamente cuando el estado del sistema se corresponde con la generación de dicho bloque de pulsos.

Finalmente, se obtiene el tren de pulsos de la señal de disparo completa como la suma lógica de los trenes de pulsos parciales (ver *figura 3.15*).

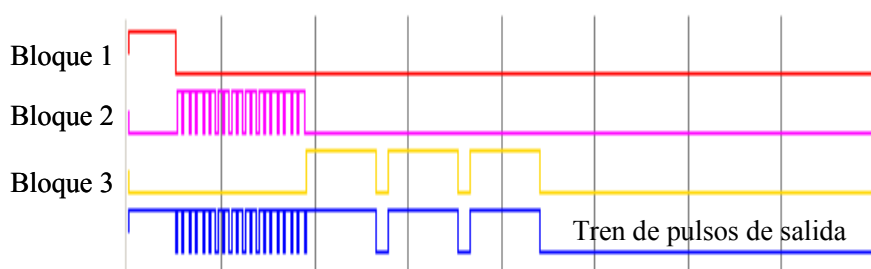


Figura 3.15. Formas de onda simuladas de la señal de control

El código VHDL de las distintas técnicas de disparo multipulso se encuentran en el *Anexo 1*, mientras los flujogramas correspondientes a cada una de ellas están en el *Anexo 2*.

3.4. ANÁLISIS COMPARATIVO

Teniendo en cuenta las conclusiones obtenidas en los apartados previos, se ha realizado un estudio comparativo con los dos solenoides vistos anteriormente. Se han utilizado además dos tensiones de entrada diferentes: 42 V, próximo al máximo valor de tensión que limita la normativa de seguridad eléctrica y 24 V, tensión de entrada empleada actualmente en las impresoras Braille. Además, se han analizado con ambas tensiones técnicas de disparo de un solo pulso y técnicas multipulso con las

características descritas previamente. Se ha de tener en cuenta que el *vuelo* (distancia que recorre el vástago hasta impactar en el papel) es de 2 mm para ambos solenoides.

Las medidas realizadas se han comparado para su clasificación principalmente teniendo en cuenta la calidad del punto obtenido. Además, se han considerado otros aspectos que pueden ser de cierta importancia a la hora de seleccionar una solución adecuada, tales como el ruido de impresión y el incremento de temperatura del solenoide.

3.4.1. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO

Como ya se mencionó anteriormente, la carga (Q) debía ser aproximadamente constante en cada solenoide para obtener un punto impreso con la calidad adecuada. Las cargas (Q) de acercamiento y de impresión necesarias para ambos solenoides se comparan en la *tabla 3.4*. Se observa que el *solenoide tipo B* necesita menos carga, aproximadamente la mitad, tanto para el acercamiento del vástago al papel como para la impresión del punto.

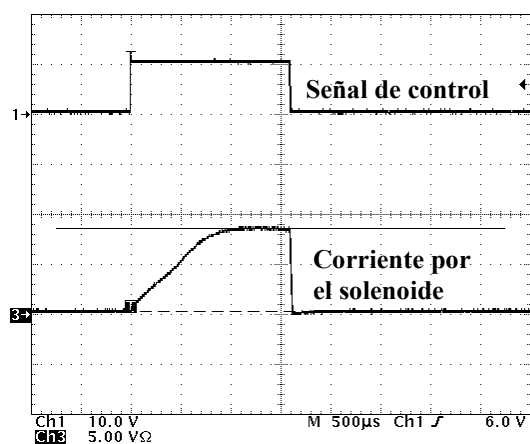
Tabla 3.4. Comparación de la carga necesaria para el acercamiento y la impresión del solenoide, medida a partir de una señal de pulso único y con una tensión de entrada de 42V

Solenoide	$Q_{\text{acercamiento}} \text{ (A}\cdot\text{s)}$	$Q_{\text{impresión}} \text{ (A}\cdot\text{s)}$
Tipo A	$4,9\cdot 10^{-3}$	$9,9\cdot 10^{-3}$
Tipo B	$2,2\cdot 10^{-3}$	$5,4\cdot 10^{-3}$

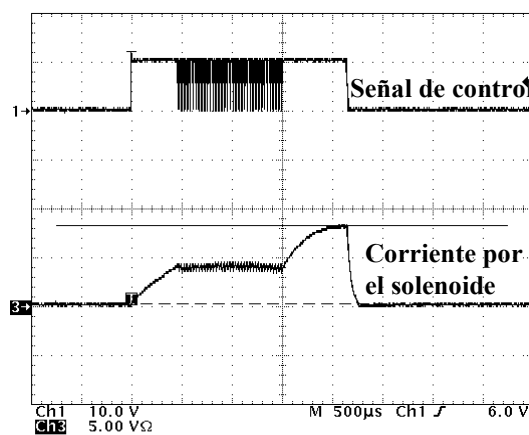
En la *figura 3.16* y *figura 3.17* se muestran, a modo de ejemplo ilustrativo, las formas de onda de corriente en los solenoides *tipo A* y *tipo B* respectivamente cuando se aplican las distintas técnicas de control mencionadas anteriormente sobre el interruptor de la topología de ensayos. La tensión de entrada con la que se han realizado estas medidas es de 24 V para ambos.

Observando la forma de la corriente que circula por ambos solenoides al aplicar la técnica de pulso único (*figura 3.16a* y *figura 3.17a*), se puede apreciar que la pendiente con la que sube cada una de ellas es diferente. En el caso del *solenoide tipo A*, la corriente sube con una pendiente casi constante hasta que llega un momento en que

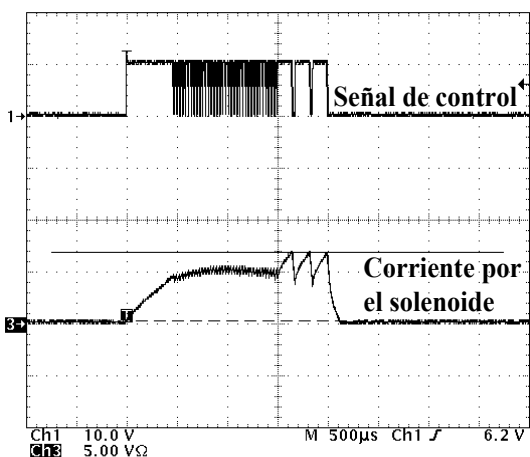
varía bruscamente. Sin embargo, la corriente en el *solenoide tipo B* varía progresivamente. Esto implica que no sea posible aplicar todas las técnicas de disparo al *solenoide tipo B*, como es el caso de la técnica de multipulso 3 (ver *figura 3.17d*), que como se puede apreciar, no es comparable con el resto de técnicas de disparo en cuanto a tiempos y valores máximos de corriente por el solenoide. Para poder aplicar esta forma de control ha sido necesario reducir el nivel de corriente máxima de la técnica de multipulso 3, ya que de no ser así, el impacto alcanzaría la calidad óptima antes de que la corriente llegara al valor máximo establecido anteriormente.



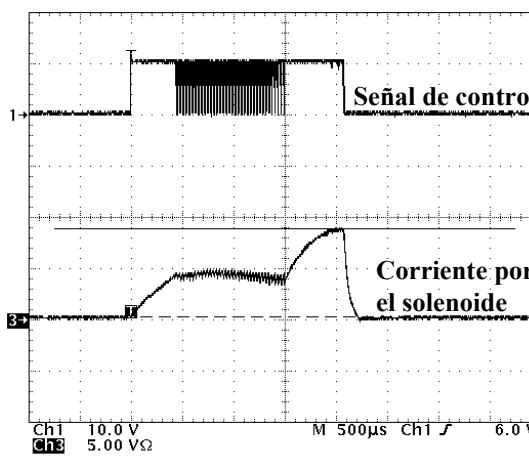
a. Pulso único: $t_{on}=1,6$ ms. $I_{sol,MAX}=8,5A$



b. Multipulso 1: $t_{on}=2,15$ ms. $I_{sol,MAX}=8,2A$

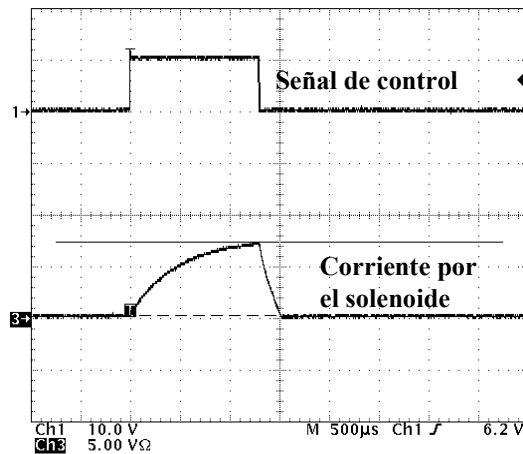


c. Multipulso 2: $t_{on}=2$ ms. $I_{sol,MAX}=6,8A$

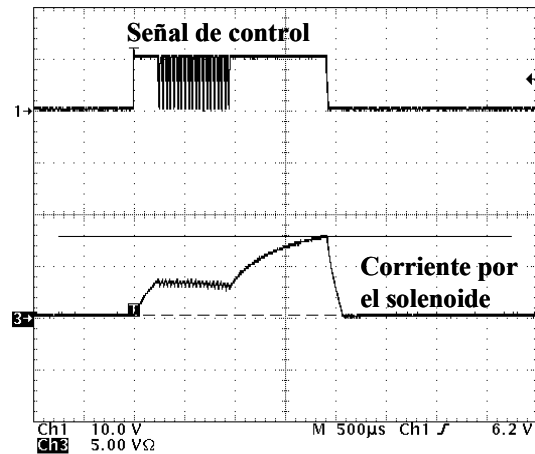


d. Multipulso 3: $t_{on}=2,08$ ms. $I_{sol,MAX}=8,8A$

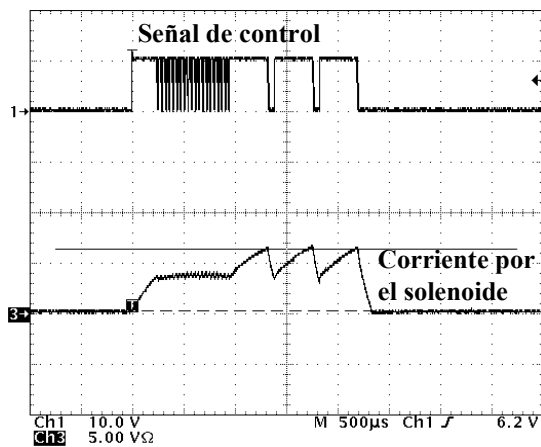
Figura 3.16. Formas de corriente por el solenoide tipo A al aplicar diversas formas de disparo. $V_E=24$ V



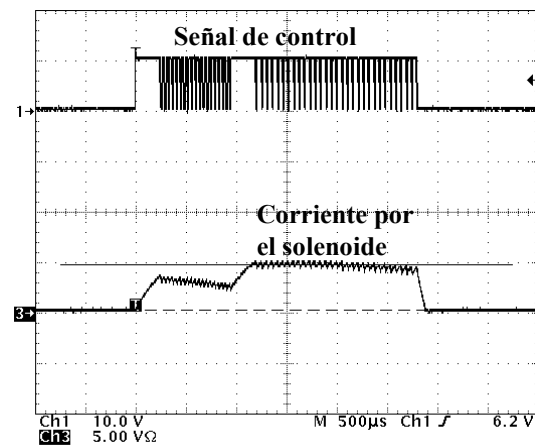
a. Pulso único: $t_{on}=1,3$ ms. $I_{sol,MAX}=7,3A$



b. Multipulso 1: $t_{on}=1,92$ ms. $I_{sol,MAX}=7,8A$



c. Multipulso 2: $t_{on}=2,2$ ms. $I_{sol,MAX}=6,3A$



d. Multipulso 3: $t_{on}=2,8$ ms. $I_{sol,MAX}=4,7A$

Figura 3.17. Formas de corriente por el solenoide tipo B al aplicar diversas formas de disparo. $V_E=24$ V

En las *tabla 3.5* y en la *tabla 3.6* se recogen los parámetros más importantes de los distintos tipos de disparo con las posibles tensiones de entrada seleccionadas para los dos tipos de solenoide a comparar.



Tabla 3.5. Valores de corriente máxima y tiempos de magnetización y desmagnetización para los distintos tipos de disparo del solenoide tipo A

	SOLENOIDE A					
	42V			24V		
	$t_{on}(ms)$	$t_{off}(ms)$	$I_{max}(A)$	$t_{on}(ms)$	$t_{off}(ms)$	$I_{max}(A)$
PULSO ÚNICO	1	0,02	14,6	1,6	0,02	8,5
MULTIPULSO 1	1,155	0,18	14,3	2,15	0,14	8,2
MULTIPULSO 2	0,85	0,19	14,2	2	0,11	6,8
MULTIPULSO 3	1,055	0,18	14,3	2,08	0,13	8,8

Tabla 3.6. Valores de corriente máxima y tiempos de magnetización y desmagnetización para los distintos tipos de disparo del solenoide tipo B

	SOLENOIDE B					
	42V			24V		
	$t_{on}(ms)$	$t_{off}(ms)$	$I_{max}(A)$	$t_{on}(ms)$	$t_{off}(ms)$	$I_{max}(A)$
PULSO ÚNICO	0,8	0,2	13,5	1,3	0,2	7,3
MULTIPULSO 1	0,944	0,2	13,1	1,92	0,18	7,8
MULTIPULSO 2	1,194	0,15	9,8	2,2	0,12	6,3
MULTIPULSO 3	0,944	0,24	11,1	2,8	0,08	4,7

Las conclusiones más significativas a la vista de los resultados obtenidos en ambas tablas son las siguientes:

- Los tiempos de magnetización de los solenoides (t_{on}) y las corrientes máximas son ligeramente inferiores en la mayoría de los casos para el *solenoide tipo B* en comparación con el *solenoide tipo A*.



- El tiempo de desmagnetización (t_{off}) es bastante reducido en comparación con el tiempo de magnetización (reducción de hasta un 99%).
- Los tiempos de magnetización, como es de esperar, son superiores al aplicar tensiones de entrada menores. Sin embargo, sucede lo contrario con los valores de corriente máxima por el solenoide.
- Las medidas mostradas en la *tabla 3.6*, para el caso del multipulso 3, según se comentó previamente, no son comparables con el resto de las técnicas utilizadas. Esto es porque las condiciones de funcionamiento del solenoide son diferentes al resto, provocando que los tiempos de magnetización del solenoide sean excesivos en comparación con el resto de técnicas de disparo. De aquí se concluye que esta técnica queda descartada, por lo que no se tendrá en consideración para el análisis del ruido de impresión y de la temperatura.

3.4.2. CALIDAD DEL PUNTO

Si se comparan en detalle los resultados obtenidos con cada solenoide, se puede deducir que las técnicas de pulso único ofrecen resultados similares en cuanto a la calidad del punto que las técnicas multipulso.

Por tanto, teniendo en cuenta la sencillez de control, es más adecuado utilizar técnicas de pulso único. Comparando las diferentes técnicas para los distintos casos evaluados se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Para el solenoide A:**
 - a. Tanto para 24 V como 42 V las técnicas de multipulso 1 y 3 son muy parecidas en calidad de punto. Por tanto, es más adecuado utilizar la técnica de multipulso 1 por simplicidad y pérdidas en conmutación del interruptor.
 - b. El disparo con un pulso único o un multipulso de tipo 1 son equivalentes en calidad del punto. Además, no se aprecian diferencias significativas al variar la tensión de 24 V a 42 V.

- **Para el solenoide B:**

- a. Para 24 V, la técnica de multipulso 2 produce un punto de mejor calidad (más esférico). No obstante, existe poca variación de su calidad respecto al punto obtenido con multipulso 1 y pulso único, que son técnicas más sencillas y que suponen menos pérdidas de conmutación en el interruptor.
- b. Para 42 V, destaca el multipulso 1 por ser el más sencillo y producir menores pérdidas de conmutación que el resto de técnicas multipulso, siendo los tiempos de encendido similares en todas las técnicas multipulso.
- c. Tanto para 42 V como para 24 V, las técnicas de multipulso 1 y pulso único proporcionan puntos de calidad similar con tiempos de encendido menores o iguales que el resto de técnicas analizadas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la selección de los ensayos más adecuados desde el punto de vista de la calidad del punto es:

- *Solenoide tipo B:* $V_E=24$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo B:* $V_E=42$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo A:* $V_E=24$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo A:* $V_E=42$ V, Multipulso 1 o pulso único

Si se tiene en cuenta el tiempo necesario para la impresión, es más adecuado usar, en ambos solenoides, la técnica de pulso único con la tensión de entrada mayor porque el tiempo de activación del solenoide es apreciablemente inferior al tiempo de las técnicas multipulso.

3.4.3. RUIDO DE IMPRESIÓN

Los ensayos referentes al ruido producido por el impacto de los solenoides tienen únicamente carácter cualitativo, es decir, no se han medido los niveles de ruido emitido en cada prueba realizada. Al igual que en las anteriores pruebas, el accionador de los solenoides es un convertidor elevador; y se analizan dos tipos de solenoides con tensiones de entrada de 42 V y 24 V, controlados mediante cuatro posibles técnicas de disparo.

Tras las diversas pruebas realizadas se puede concluir que las diferencias en cuanto al ruido producido en cada una de ellas son prácticamente inapreciables, habiendo un ligero incremento del mismo cuando se trabaja a 42 V con respecto a 24 V.

Otra observación importante es que en el ruido producido por el *solenoide tipo A* se puede percibir un sonido adicional correspondiente al movimiento de un muelle (sonido doble en el proceso del impacto), que no es perceptible con el *solenoide tipo B*.

Por lo tanto, desde el punto de vista del ruido, la selección de ensayos ordenada de menor a mayor ruido de impresión es la siguiente:

- *Solenoide tipo B*: $V_E=24$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo B*: $V_E=42$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo A*: $V_E=24$ V, Multipulso 1 o pulso único
- *Solenoide tipo A*: $V_E=42$ V, Multipulso 1 o pulso único

3.4.4. TEMPERATURA

Para poder realizar comparaciones en términos de la temperatura alcanzada por el solenoide con las diferentes técnicas implementadas se utiliza para la medición de la temperatura un termopar y un polímetro. La medida de la variación de temperatura de cada ensayo se realiza transcurridos 10 minutos desde el comienzo del funcionamiento del solenoide.

La primera prueba ha consistido en aplicar al *solenoide tipo A* las condiciones de funcionamiento empleadas comúnmente en impresoras Braille, donde la topología empleada es la que se representa en la *figura 3.18* y la señal de control del solenoide (V_g) es un pulso único que se aplica durante un tiempo de 1,26 ms. La tensión de alimentación en este caso es de 24 V y la frecuencia de funcionamiento de 30,30 Hz.

Los resultados obtenidos bajo estas condiciones de funcionamiento muestran un calentamiento del solenoide de 31 °C, desde los 25 °C iniciales hasta los 56 °C finales.

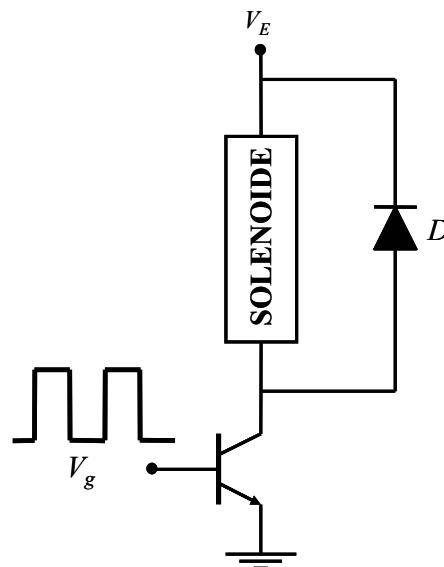


Figura 3.18. Topología original empleada para el accionamiento de los solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto

Tras esta primera prueba se ha realizado una medida de la variación de la temperatura de los dos tipos de solenoide considerados, empleando un convertidor elevador como topología para el accionamiento de los mismos. El fin de este análisis es obtener un estudio comparativo y cualitativo entre las diferentes técnicas de control y tensiones de alimentación propuestas. De este modo, la frecuencia de funcionamiento del solenoide en estos ensayos se ha reducido a 5 Hz por ser la frecuencia con la que se realizaron las pruebas de comportamiento eléctrico, calidad del punto y ruido de impresión. Se recuerda que la técnica de multipulso 3 quedó descartada para las pruebas de temperatura porque no es comparable al resto de técnicas de control ni en tiempos ni en corrientes máximas.

En la *tabla 3.7* y la *tabla 3.8* se resumen los resultados obtenidos con las distintas técnicas. Se observa que los incrementos de temperatura obtenidos, como era de esperar, son aproximadamente seis veces menores que los obtenidos a frecuencia de funcionamiento normal, que como se comentó anteriormente es de 30,30 Hz (aproximadamente seis veces mayor a la considerada).



Tabla 3.7. Medida de variación de la temperatura del solenoide tipo A

	SOLENOIDE A			
	42 V		24 V	
	T _{INI} (°C)	T _{FIN} (°C)	T _{INI} (°C)	T _{FIN} (°C)
PULSO ÚNICO	25	35	25	32
MULTIPULSO 1	25	36	25	30
MULTIPULSO 2	25	35	25	31

Tabla 3.8. Medida de variación de la temperatura del solenoide tipo B

	SOLENOIDE B			
	42 V		24 V	
	T _{INI} (°C)	T _{FIN} (°C)	T _{INI} (°C)	T _{FIN} (°C)
PULSO ÚNICO	25	28	25	28
MULTIPULSO 1	25	29	25	28
MULTIPULSO 2	25	28	25	27

De los resultados de este análisis se pueden extraer las primeras conclusiones acerca de las diferentes condiciones de funcionamiento implementadas:

- En el *solenoide tipo A* se produce un mayor incremento de temperatura, apreciable sobre todo a 42 V. Esto se debe a que el valor de resistencia de este tipo de solenoide es mayor que el del *solenoide tipo B*. Se recuerda que los valores de resistencia para el *solenoide tipo A* y el *solenoide tipo B* con el vástago en su máximo recorrido son 3,396 Ω y 2,46 Ω respectivamente (ver *tabla 3.3*).
- El uso de las técnicas de multipulso 1 y 2 o de pulso único no supone diferencias significativas en el incremento de temperatura. Por una parte, en el caso del *solenoide tipo A*, la variación de temperatura es de aproximadamente 10 °C al

emplear tensiones de 42 V, mientras que para tensiones de 24 V esta variación está entorno a los 6 °C. Por otra parte, para el *solenoide tipo B* la variación de temperatura es de aproximadamente 3 °C independientemente de la tensión de entrada empleada (ver *tabla 3.7* y *tabla 3.8*).

- Se penaliza en mayor grado el dispositivo con mayores tensiones, ya que los niveles de corriente son mayores. En el caso del *solenoide tipo A* es mejor trabajar con tensiones menores, donde las pérdidas son menores, mientras que para el *solenoide tipo B* estas diferencias no son tan significativas.

En último lugar, se pretenden comparar los resultados desde el punto de vista del calentamiento del solenoide entre la topología elevadora (*figura 3.4*) y la topología empleada originariamente para el accionamiento de los solenoides (*figura 3.18*). Para ello, se ha medido la variación de la temperatura experimentada por el *solenoide tipo A* al emplear ambas topologías. Las condiciones de funcionamiento de este ensayo consisten en aplicar una tensión de entrada de 24 V, disparando con una señal de pulso único y a una frecuencia de 5 Hz.

Comparando los datos obtenidos del ensayo térmico para el convertidor elevador (ver caso de 24 V y pulso único en *tabla 3.7*) con los obtenidos para el circuito accionador empleado habitualmente (*tabla 3.9*), se puede concluir que no se obtienen mejoras significativas entre ambas topologías en términos de variación de la temperatura. En ambos casos el incremento de temperatura es de 7 °C.

Tabla 3.9. Variación de la temperatura del solenoide tipo A con la topología original. $f=5$ Hz

	SOLENOIDE A	
	24 V	
	T _{INI} (°C)	T _{FIN} (°C)
PULSO ÚNICO	23	30

Teniendo en cuenta el análisis térmico realizado, se puede concluir lo siguiente:

- En ambos solenoides se obtienen resultados aceptables, aunque es más ventajoso emplear el *solenoide tipo B*, ya que a igualdad de condiciones, las temperaturas alcanzadas son menores.

- El incremento de temperatura en el caso del *solenoide tipo B* con 42 V de tensión de entrada es incluso menor que en el caso del *solenoide tipo A* con 24 V de tensión de entrada, en todas las técnicas de disparo considerada.
- Desde el punto de vista térmico, el peor caso corresponde al *solenoide tipo A* con 42 V de tensión de entrada.

Aunque en todos los casos se alcanzan resultados aceptables, desde el punto de vista del calentamiento del solenoide, la selección de ensayos ordenada de menor a mayor aumento de temperatura es la mostrada a continuación:

- *Solenoide tipo B*: $V_E=24\text{ V}$
- *Solenoide tipo B*: $V_E=42\text{ V}$
- *Solenoide tipo A*: $V_E=24\text{ V}$
- *Solenoide tipo A*: $V_E=42\text{ V}$

3.4.5. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

Teniendo en cuenta todos los parámetros considerados, la opción más ventajosa para su uso en impresoras Braille de tipo impacto sería la de utilizar el ***solenoide tipo B gobernado por una señal de pulso único y alimentado con 42 V***. Entre los dos solenoides considerados, el *solenoide tipo B* requiere una menor cantidad de energía, lo que supone menores tiempos de activación y corrientes máximas. Esto no solo es ventajoso para obtener mayores velocidades de impresión, sino que supone un menor calentamiento con respecto al otro solenoide. Además, el *solenoide tipo A* emite dos tipos de ruido durante su funcionamiento, mientras el *solenoide tipo B* emite únicamente el ruido del impacto. Esto convierte al *solenoide tipo B* en la mejor alternativa también desde el punto de vista del ruido producido. En cuanto a las técnicas de control, las diferencias mostradas entre la técnica de pulso único y las técnicas multipulso han sido inapreciables en todos los aspectos. Sin embargo, como las pérdidas de conmutación al emplear la técnica de pulso único son inferiores, se convierte en la mejor alternativa en cuanto a la forma de disparo. Finalmente, con 42 V se favorece el aumento de la velocidad de impresión, ya que mayores tensiones de entrada suponen mayores corrientes máximas a costa de reducir los tiempos de activación.



CAPÍTULO 4

*ESTUDIO
DE LOS DISTINTOS
ACCIONADORES
DEL SOLENOIDE*



En este capítulo se estudian las características principales de cuatro posibles topologías para el accionamiento eléctrico de los solenoides empleados en impresoras Braille de tipo impacto. Para ello se comienza haciendo una introducción de los parámetros que se han tenido en consideración durante la realización de dicho estudio. Posteriormente se presentan las condiciones de funcionamiento con las que se ha realizado el análisis. Finalmente se muestra un análisis comparativo entre las distintas topologías.

4.1. OBJETIVOS

El siguiente estudio pretende analizar distintas alternativas constructivas de accionadores de los solenoides empleados en impresoras Braille. A continuación se enumeran los parámetros que servirán para comparar las distintas alternativas que se van a considerar:

- **Incremento de la velocidad de impresión.** El estudio del tiempo de desmagnetización permitirá comparar la velocidad de impresión que se puede conseguir con las distintas alternativas. Este tiempo, en general, dependerá de la tensión aplicada al solenoide durante el proceso de desmagnetización. Se estudiará en detalle el circuito elevador utilizado en la fase de caracterización del solenoide, pero además se analizarán otras topologías que también consiguen una importante reducción en el tiempo de desmagnetización de los solenoides.
- **Focos de calor en el accionador.** En general la mayoría de las alternativas analizadas suponen que durante el proceso de desmagnetización la energía almacenada en el solenoide se disipa en algún elemento. Es imprescindible estimar los incrementos de temperatura en la placa del accionador y valorar si van a existir focos concentrados de calor o bien la temperatura va a estar distribuida por toda la placa. Del resultado de esta estimación se deducirá si es necesario añadir elementos disipadores, lo que supondría un incremento del tamaño de la placa.
- **Complejidad del accionador.** El número de componentes y la naturaleza de los mismos resultarán claves a la hora de escoger entre una u otra alternativa, ya que la fiabilidad y robustez de la solución está directamente relacionada con estos factores.

La elección de un diseño demasiado complejo solo podría justificarse por una mejora significativa del resto de los parámetros respecto a las otras alternativas.

- **Solicitaciones eléctricas de los semiconductores.** En todos los casos se analizarán las tensiones y corrientes máximas que deben soportar los semiconductores. Este apartado es básico para estimar coste, tamaño y fiabilidad de la solución.

En todos los casos, se asegurará el cumplimiento de la normativa de baja tensión, de modo que la tensión media en cada componente será menor que los 75 V máximos especificados en dicho reglamento.

4.2. CONDICIONES DE COMPARACIÓN

Las condiciones de funcionamiento que se emplearán para analizar las topologías que se van a estudiar son las que se propusieron en el capítulo de la caracterización del solenoide, es decir:

- **Solenoide tipo B.**
- **Tensión de entrada igual a 42 V.**
- **Control del solenoide por pulso único**, siendo la duración del pulso de 0,8 ms.

La comparativa entre las distintas alternativas se lleva a cabo a través de la herramienta de simulación de circuitos eléctricos *PSIM* por la sencillez que supone.

Al no disponer de un modelo eléctrico preciso del solenoide, se ha recurrido a representarlo como una única bobina no variable (L_{SOL}) en serie con una resistencia no variable (R_{SOL}) para la realización de las simulaciones. En el caso del *solenoide tipo B*, la inductancia y resistencia obtenidas para la realización de las simulaciones valen 1,2 mH y 2,54 Ω respectivamente (ver *figura 4.1*). Los valores de esta resistencia e inductancia son el resultado de una media aritmética de las medidas de resistencia e inductancia respectivas de varios solenoides del tipo B.

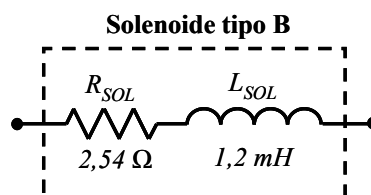


Figura 4.1. Modelo simulado del solenoide tipo B

Este modelo es muy simple y no se ajustaría con total precisión al comportamiento real del solenoide, cuya inductancia y resistencia varían en función de la posición de vástago. Sin embargo, utilizando estos valores las formas de la corriente que circula por el solenoide en el modelo real (*figura 4.2*) y en el modelo simulado (*figura 4.3*) son muy parecidas. Lo mismo sucede con los tiempos de magnetización y desmagnetización, por lo que se puede considerar que el modelo utilizado caracteriza con suficiente precisión el comportamiento real del solenoide.

Para realizar la comparación entre la forma de corriente real que circula por el solenoide observada en la *figura 4.2* y la misma gráfica obtenida de forma simulada (*figura 4.3*), se ha empleado para el accionamiento del solenoide un convertidor CC-CC con topología elevadora.

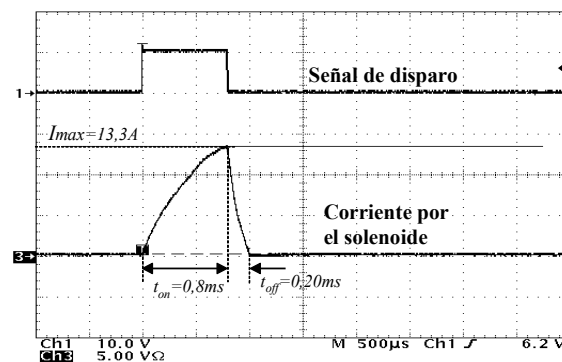


Figura 4.2. Respuesta real del solenoide tipo B

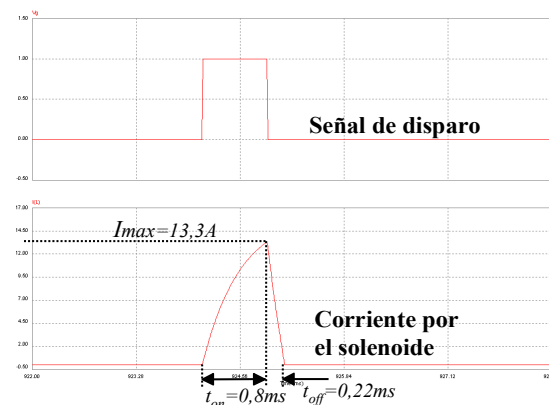


Figura 4.3. Respuesta simulada del solenoide tipo B

Para todo el análisis se va a considerar una impresora Braille industrial, que se caracteriza por tener siete grupos de doce solenoides produciendo puntos a la vez. Sin

embargo, debido a la reducción de los tiempos de desmagnetización por debajo de los 0,5 ms, se posibilita la secuenciación de disparo de los solenoides. Esto conllevaría una reducción de los niveles de ruido, así como una disminución de las sollicitaciones eléctricas máximas.

En la *figura 4.4a* se representa el esquema de control de los solenoides con disparo secuenciado. Mediante esta forma de control, cada matriz de solenoides recibe un disparo propio.

Para realizar la simulación de la secuencia de disparo se ha simplificado el esquemático reduciendo a doce el número de solenoides, cada uno de los cuales recibe siete pulsos seguidos con una separación de 0,5 ms entre ellos (*figura 4.4b*). Los resultados en cuanto a potencias disipadas son equivalentes al modelo real de la impresora industrial, siempre que se asegure que cada solenoide ha desmagnetizado por completo antes de volver a aplicarle un pulso.

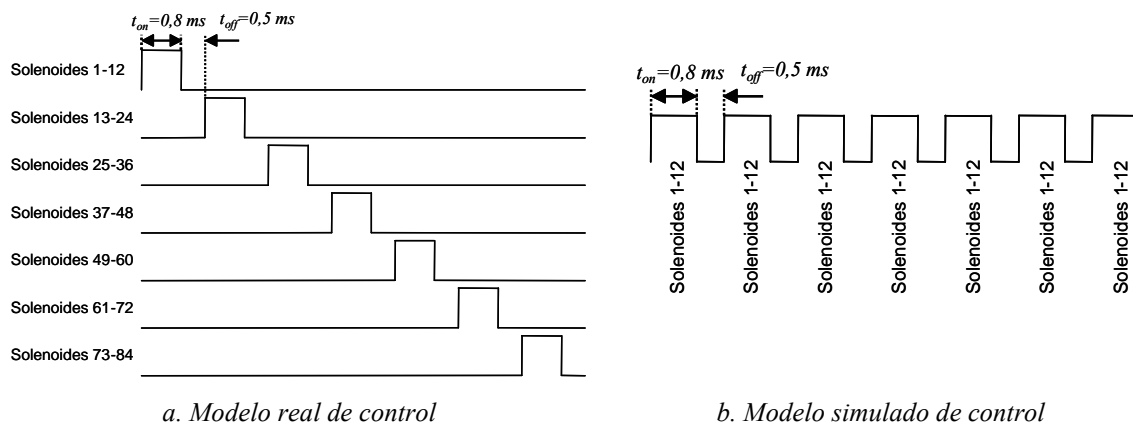
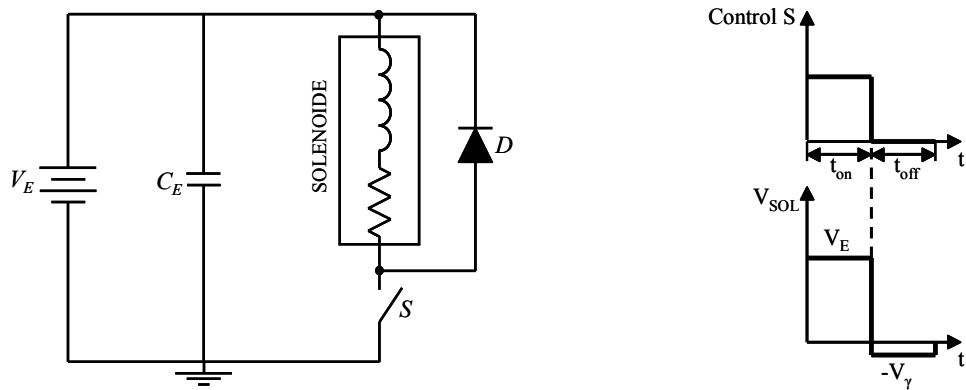


Figura 4.4. Modelo de control de los solenoides de las impresoras Braille

4.3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TOPOLOGÍA ORIGINAL

En la *figura 4.5* se muestra la topología de partida que se utiliza en la impresora Braille considerada.



a. Topología básica empleada para el accionamiento de los solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto

b. Tensión en el solenoide

Figura 4.5. Configuración original del accionador del solenoide

Durante el tiempo de encendido (t_{on}) del interruptor S , la corriente por el solenoide aumenta con una pendiente V_E/L , produciéndose en este intervalo el movimiento del vástago hacia el papel, hasta alcanzar la energía necesaria para el impacto y obtener así el punto impreso. Se ha de tener en cuenta que la pendiente con la que crece la corriente no es constante, sino que varía como consecuencia de la variación del valor de la inductancia producida por el movimiento del vástago.

Durante el tiempo de apagado (t_{off}) se aplica una tensión inversa sobre la bobina con valor V_γ , siendo V_γ la tensión en directa del diodo. De este modo, la corriente por el solenoide disminuye con una pendiente V_γ/L . Es condición indispensable que la corriente se anule ciclo a ciclo (desmagnetización completa del solenoide) para limitar las pérdidas del dispositivo y lograr un buen funcionamiento del mismo.

Por lo tanto, **la velocidad de impresión del solenoide depende de la tensión de entrada y de la tensión de caída directa del diodo**. Mediante un incremento de la tensión de entrada sería posible reducir el tiempo de excitación del solenoide. Por otro lado, el tiempo de recuperación del solenoide se puede reducir incrementando el valor de la tensión inversa aplicada.

Teniendo en cuenta la topología representada en la figura 4.5a, en la figura 4.6 se ilustra la forma de la corriente del solenoide tipo A al aplicar una señal de control por pulso único sobre el interruptor (S). En esta figura se aprecia una variación de la pendiente de subida de la corriente durante la magnetización del solenoide, provocada

por la variación de la inductancia durante el desplazamiento del vástago. También se observa que la desmagnetización del solenoide se produce de forma mucho más lenta que la magnetización. Este hecho es consecuencia de la reducida tensión inversa aplicada sobre el solenoide (V_γ) durante la desmagnetización.

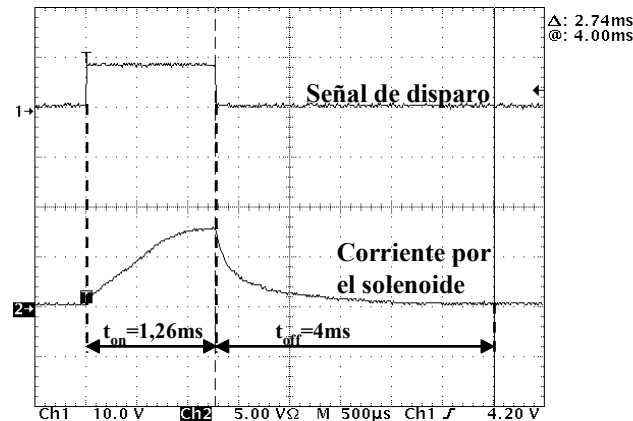


Figura 4.6. Forma de la corriente que circula por el solenoide al emplear la topología original

Aunque no se muestra la realización de este ensayo con el *solenoide tipo B*, el resultado en cuanto al tiempo de desmagnetización (t_{off}) es ligeramente inferior al del *solenoide tipo A*.

4.4. TOPOLOGÍAS ESTUDIADAS

Las alternativas que se van a analizar para cumplir con los objetivos propuestos son cuatro. Dos de ellas tienen carácter disipativo y las otras dos recuperan parte de la energía:

- **Topología elevadora.** Consiste en emplear un convertidor CC-CC con topología elevadora, donde el solenoide sustituye a la bobina que formaría parte de dicha topología. El aspecto negativo de esta propuesta es que se trata de una topología disipativa.
- **Topología elevadora más un convertidor reductor** realimentando a la entrada, que permite recircular y por tanto reutilizar la energía asociada a la desmagnetización de la inductancia del convertidor elevador (inductancia del

solenoide), enviándola de nuevo hacia la entrada. Se evitaría así la necesidad de disipar esta energía.

- **Convertidor directo con doble interruptor** como alternativa para la recirculación de energía. Consiste en un circuito sencillo formado por dos interruptores y dos diodos que permiten devolver a la fuente la energía que se emplea en desmagnetizar el solenoide (alternativa no disipativa).
- **Topología con red de desmagnetización RD.** Es la solución más sencilla de las propuestas, aunque supone disipación de potencia. Se trata de conseguir un aumento de la tensión de desmagnetización del solenoide mediante la inserción de **una resistencia** en serie con **un diodo**, colocados en antiparalelo con el solenoide.

4.5. TOPOLOGÍA ELEVADORA

Con el objetivo de mejorar la calidad del punto y reducir el tiempo de desmagnetización del solenoide, se propone la topología elevadora como alternativa a la topología original utilizada en las impresoras. Al aplicar una tensión mayor al solenoide durante la desmagnetización, el tiempo que se tarda en alcanzar una corriente igual a cero es mucho menor que en el circuito original. Como contraprestación la topología elevadora tiene una resistencia de carga que disipa parte de la potencia del circuito (R en la figura 4.7), así como un condensador (C_O en la figura 4.7) que reduce las variaciones de tensión en la carga.

En la figura 4.7 se muestra el esquema de la topología elevadora utilizada, donde el solenoide representa la bobina.

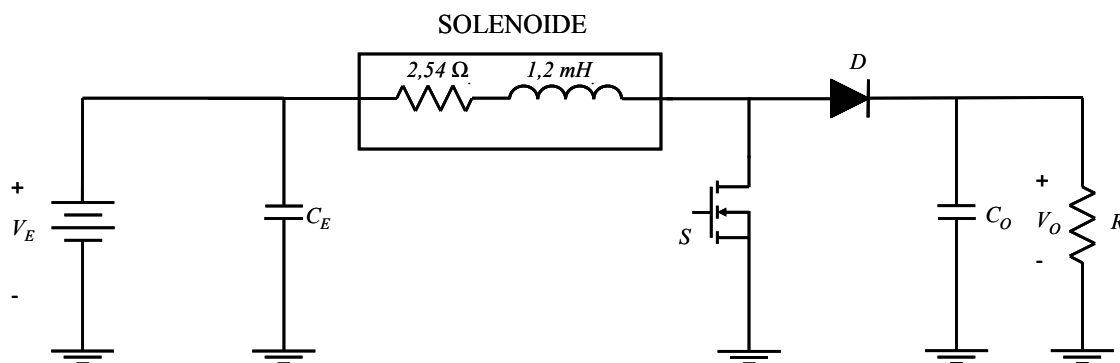


Figura 4.7. Esquema de la topología elevadora

4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Durante el tiempo en que el interruptor principal (S) está cerrado, la corriente por el solenoide aumenta con una pendiente $(V_E)/L$, siendo L variable durante el recorrido del vástago. Cuando se abre el interruptor se produce la desmagnetización de la bobina con una tensión inversa $(V_O - V_E)$, siendo esta tensión de un valor muy superior a la tensión con la que se desmagnetiza en la topología original. Se recuerda que la topología original desmagnetiza únicamente con la tensión de caída en directa del diodo.

En la *figura 4.8* se representa la forma de corriente por el solenoide al disparar el interruptor del accionador de la topología elevadora. Se aprecia claramente la reducción del tiempo de desmagnetización del solenoide con respecto a la topología original, siendo en este caso incluso menor que el tiempo de magnetización.

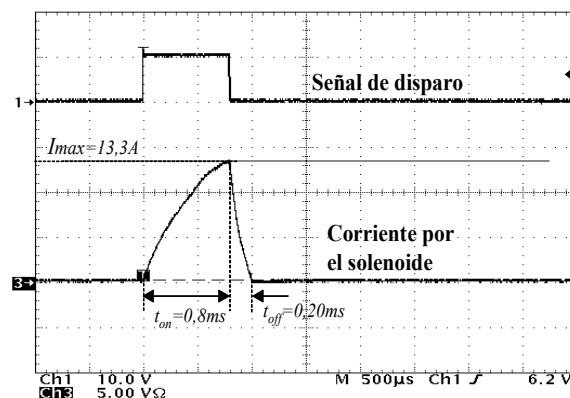


Figura 4.8. Forma de la corriente que circula por el solenoide al emplear la topología original

4.5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Para poder valorar todos los parámetros que se han definido como claves para comparar las topologías de los accionadores, se han realizado análisis de sensibilidad a distintos componentes a través de *PSIM*. Del análisis realizado se extraerán las conclusiones que permitan determinar el valor óptimo de los componentes del circuito elevador.

En el caso de la topología elevadora, se va a analizar como influye la variación de los siguientes parámetros:

- Condensador de entrada, C_E .
- Resistencia de carga, R .
- Condensador de salida, C_O .

VARIACIÓN DEL CONDENSADOR DE ENTRADA

En la *figura 4.9* y *figura 4.10*, se representa el efecto producido en la tensión de entrada al modificar el condensador de entrada. Además se muestra la secuencia de pulsos utilizada para la simulación, la tensión en la carga (o tensión de salida) y finalmente la corriente por el solenoide. En esta última gráfica se aprecia claramente como el solenoide desmagnetiza ciclo a ciclo antes del nuevo pulso, lo que supone la posibilidad de realizar el disparo secuencial de los solenoides.

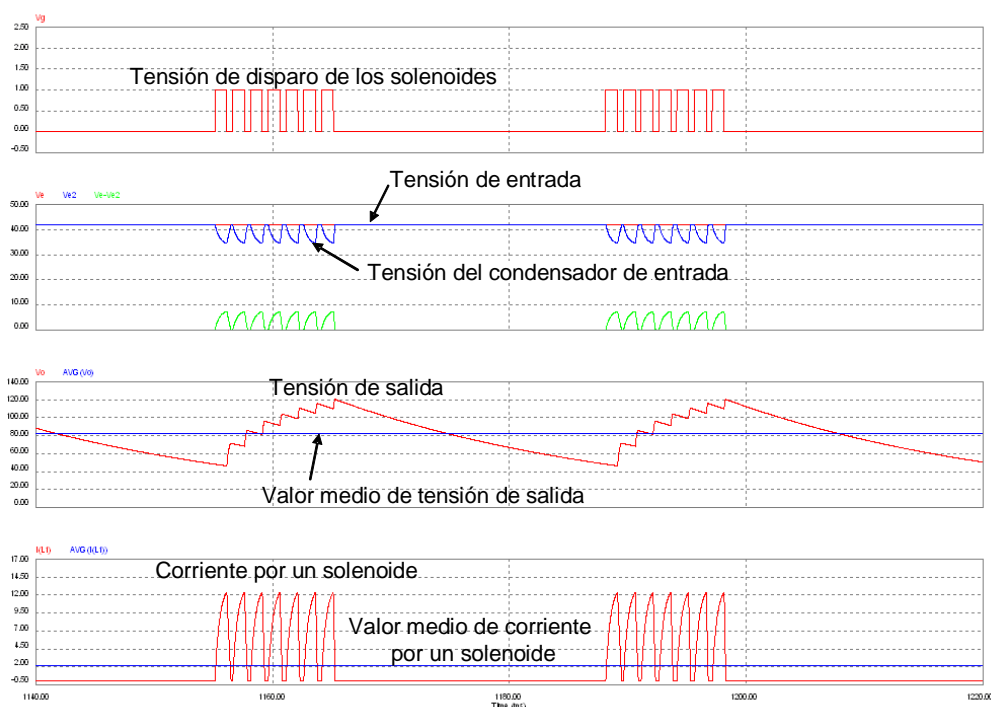


Figura 4.9. Formas de onda más significativas de la topología elevadora obtenidas con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 1 μF , condensador de salida 1000 μF , resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 82 V, potencia media disipada en la carga 289 W

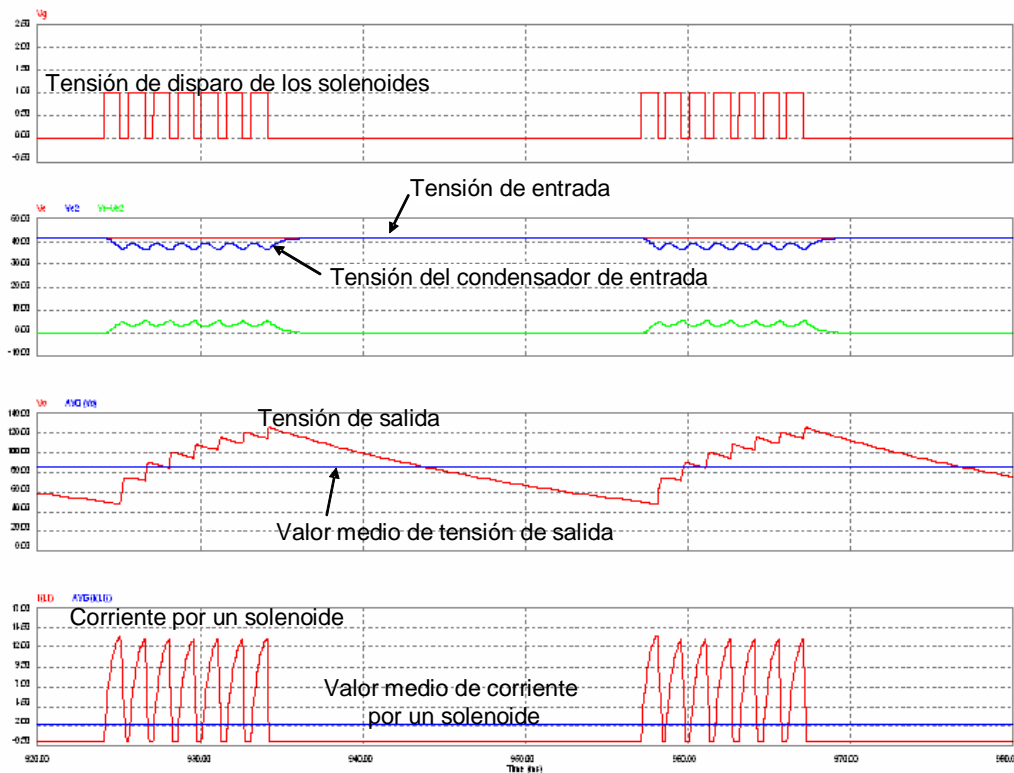


Figura 4.10. Formas de onda más significativas de la topología elevadora obtenidas con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 15000 μF , condensador de salida 1000 μF , resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 85,6 V, potencia media disipada en la carga 315 W

En las simulaciones realizadas el valor de la capacidad de entrada no influye decisivamente en el rizado de la tensión, como era de esperar. Esto es debido al hecho de que la fuente de energía se ha modelado como una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia. Este conjunto se comporta como una fuente de corriente ideal, capaz de proporcionar a los solenoides los picos de corriente que necesitan sin descargar el condensador de entrada. Por ejemplo, según se puede apreciar en la *figura 4.9* y en la *figura 4.10*, para una variación del condensador de entrada (C_E en la *figura 4.7*) entre 1 μF y 15000 μF tan solo se reduce el rizado de la tensión de entrada de un 17 % a un 12,6 %. Por lo tanto, desde el punto de vista de las simulaciones realizadas, la capacidad de entrada C_E no tiene una gran influencia en el comportamiento del convertidor. Sin embargo en el convertidor real esto no será así, y el comportamiento dinámico de la fuente de alimentación así como el valor de la capacidad de salida sí tendrá repercusión en el comportamiento del accionador.

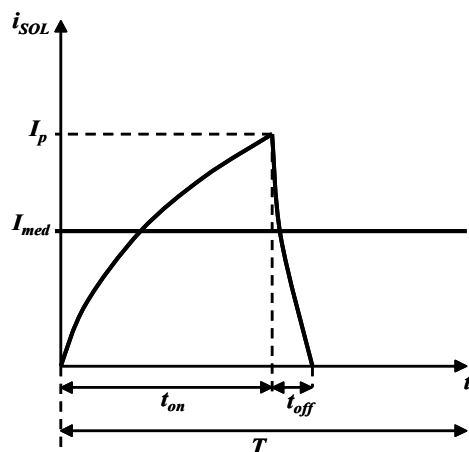
Esta situación no es realista, pero para realizar un modelado preciso del condensador de entrada sería necesario disponer de información detallada sobre la

fuente de tensión real que proporciona en este caso los 42 V de entrada: condensador de salida, características dinámicas, etc.

VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CARGA

Con el objetivo de encontrar la carga con la que se consigan menores pérdidas de potencia, se ha realizado un análisis de sensibilidad del convertidor elevador ante una variación de la resistencia de carga (R).

El consumo de potencia del circuito está principalmente marcado por el consumo del solenoide. En la *figura 4.11* se representa la forma de corriente que circula por el solenoide ante un pulso de disparo. A partir de las medidas realizadas en el capítulo 3 con los solenoides reales se determinó que las condiciones de funcionamiento óptimas suponen una corriente máxima (I_p) igual a 13,3 A con un tiempo de disparo (t_{on}) de 0,8 ms. El tiempo de desmagnetización del solenoide viene representado por t_{off} mientras que el periodo de la secuencia de disparo es T .



Potencia de entrada al elevador :
Tensión de entrada del elevador por la
corriente media que circula por el
solenoides

$$P = V_E \cdot I_{med}$$

Figura 4.11. Forma de corriente por el solenoide al aplicar un pulso de disparo

Al trabajar en modo de conducción discontinua (MCD), la resistencia de carga influye sobre la tensión de salida del elevador, que afecta directamente al tiempo de desmagnetización del solenoide. Cuanto mayor son los picos de la tensión de salida, la diferencia de tensión en el instante de la desmagnetización entre los terminales del solenoide es mayor y se desmagnetiza más rápido (menor tiempo de desmagnetización

(t_{off}) en la figura 4.11). De este modo la corriente media consumida por el solenoide será menor y la potencia disipada también será menor.

En la figura 4.12, figura 4.13 y figura 4.14 se observan las formas de onda más representativas cuando se varía la resistencia de carga desde $25\ \Omega$ hasta $50\ \Omega$. Se puede apreciar que el aumento de resistencia de carga influye sobre los picos de la tensión de salida incrementando su valor, lo que a su vez reduce los tiempos de desmagnetización del solenoide.

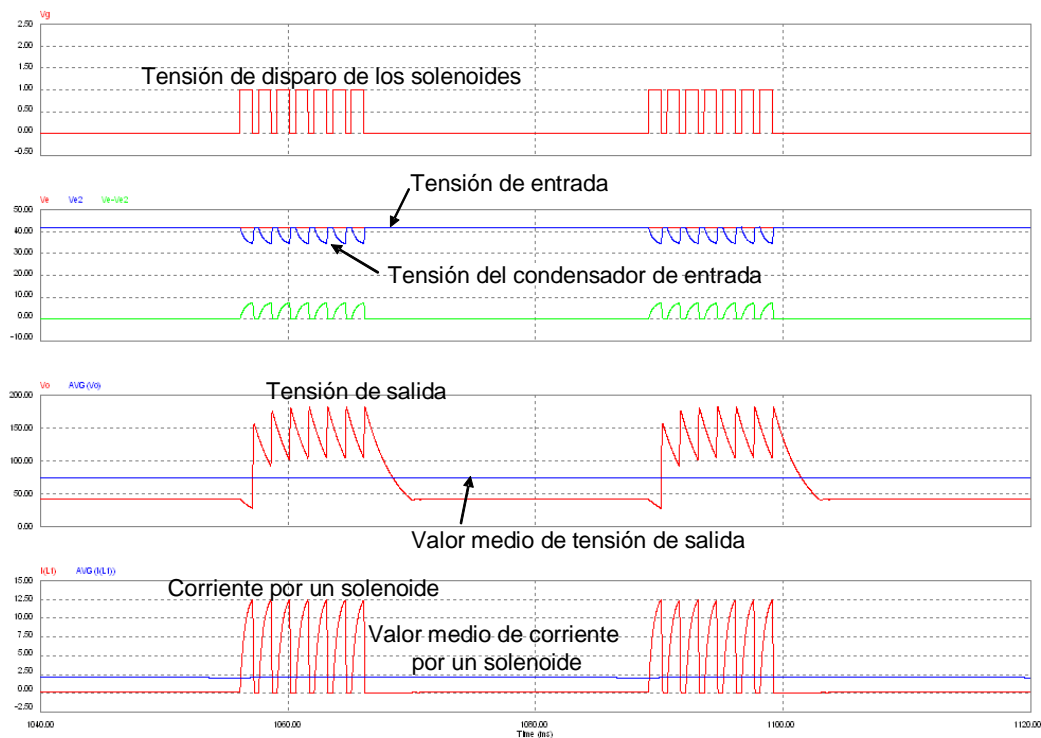


Figura 4.12. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $100\ \mu\text{F}$, condensador de salida $100\ \mu\text{F}$, resistencia de carga $25\ \Omega$, tensión media de salida $74\ \text{V}$, potencia media disipada en la carga $302\ \text{W}$

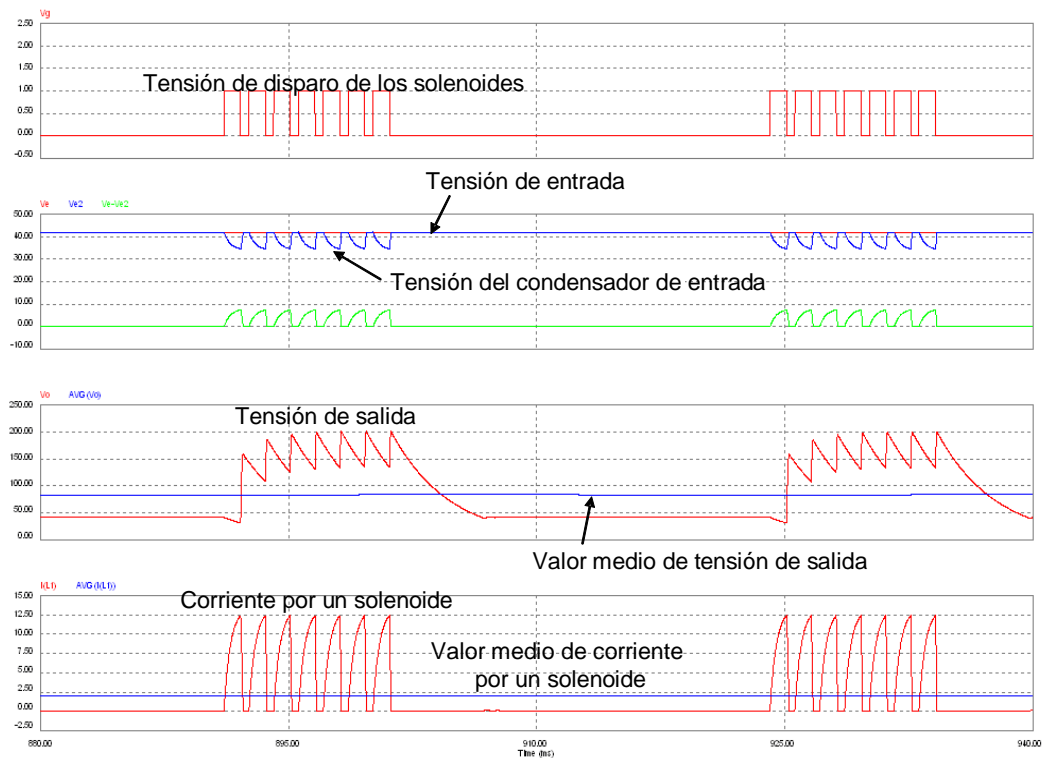


Figura 4.13. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $100\ \mu\text{F}$, condensador de salida $100\ \mu\text{F}$, resistencia de carga $35\ \Omega$, tensión media de salida $83,3\ \text{V}$, potencia media disipada en la carga $284\ \text{W}$

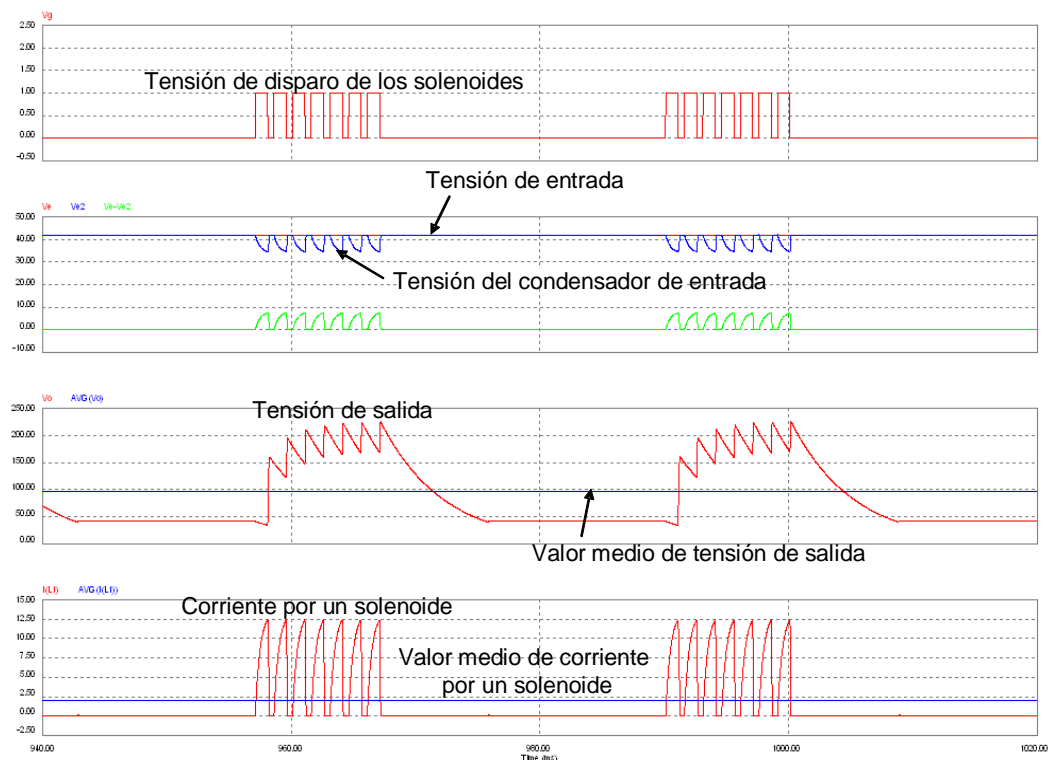


Figura 4.14. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $100\ \mu\text{F}$, condensador de salida $100\ \mu\text{F}$, resistencia de carga $50\ \Omega$, tensión media de salida $97\ \text{V}$, potencia media disipada en la carga $270\ \text{W}$

En la *tabla 4.1* se recogen los resultados derivados del análisis de sensibilidad al variar la resistencia de carga en la topología elevadora.

Tabla 4.1. Análisis de sensibilidad a la resistencia de carga

Resistencia de carga (Ω)	Tensión media de salida (V)	Tensión de pico de salida (V)	Potencia en la carga (W)
25	74	180	302
35	83,3	200	284
50	97	225	270

Los principales efectos que pueden observarse son:

- El valor de pico de la tensión de salida es mayor cuanto mayor es la resistencia de carga. Para 25 Ω la tensión de salida no supera los 200 V. Sin embargo, con una resistencia de 50 Ω el valor de pico de la tensión de salida está en torno a los 225 V. Este hecho es beneficioso desde el punto de vista de la potencia consumida, puesto que la corriente media por el solenoide es menor al reducirse el tiempo de desmagnetización del mismo. Así, cuanto mayor es el valor de la resistencia de carga, menor es la potencia de salida y mayor es el pico de tensión a la salida (270 W y 225 V_{pico} para la resistencia de 50 Ω).
- Cuanto mayor es la resistencia de carga, mayor es la constante de tiempo $\tau = R_{carga} \cdot C_0$, de modo que la descarga del condensador de salida es más lenta y el valor medio de la tensión de salida es mayor (74 V para 25 Ω y 97 V para 50 Ω). Este hecho es perjudicial para cumplir con la normativa de baja tensión, puesto que eleva el valor medio de la tensión de salida.

VARIACIÓN DEL CONDENSADOR DE SALIDA

Las formas de onda más representativas que se han obtenido al realizar el análisis de sensibilidad ante variaciones del condensador de salida se representan en la *figura 4.15*, *figura 4.16* y *figura 4.17*. En estas figuras puede comprobarse el efecto del condensador sobre la constante de tiempo. Se observa los picos de tensión en la carga

disminuyen al aumentar el condensador, ya que la descarga del mismo se hace más lenta. Otro efecto importante del aumento de la constante de tiempo es el incremento de tensión media observado, llegando a superar los valores permitidos por el reglamento de baja tensión, como ocurre al emplear un condensador de salida de 1000 μF . Por otra parte, observando las formas de corriente del solenoide, se aprecia el aumento del tiempo de desmagnetización al aumentar el condensador de salida.

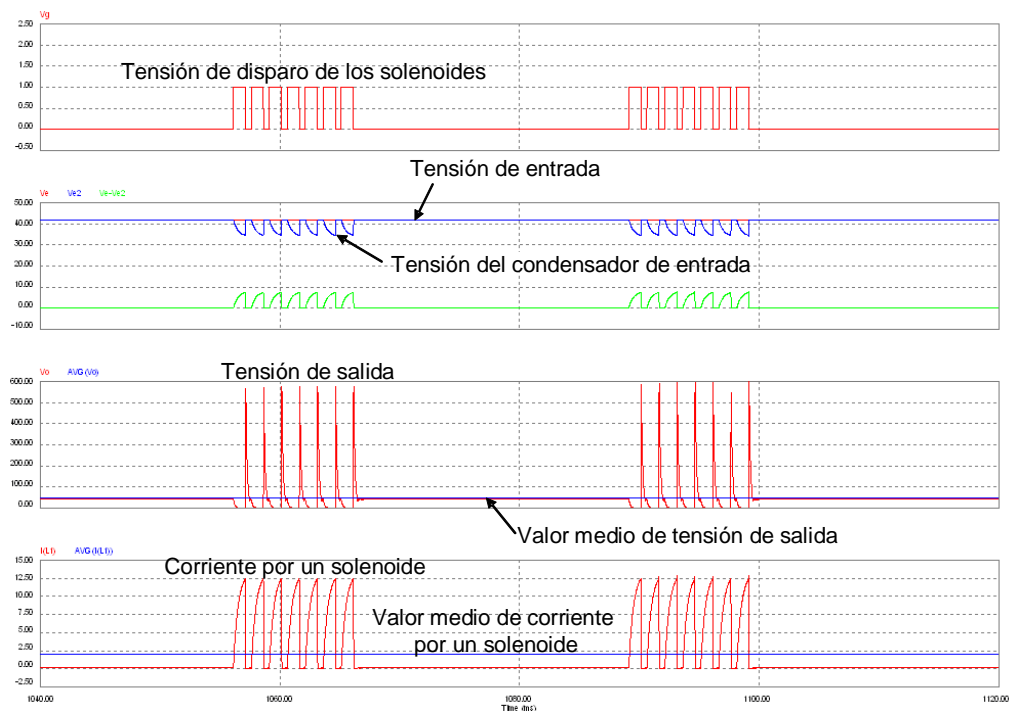


Figura 4.15. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada 1 μF , condensador de salida 4,7 μF , resistencia de carga 25 Ω , tensión media de salida 46 V, potencia media disipada en la carga 265 W

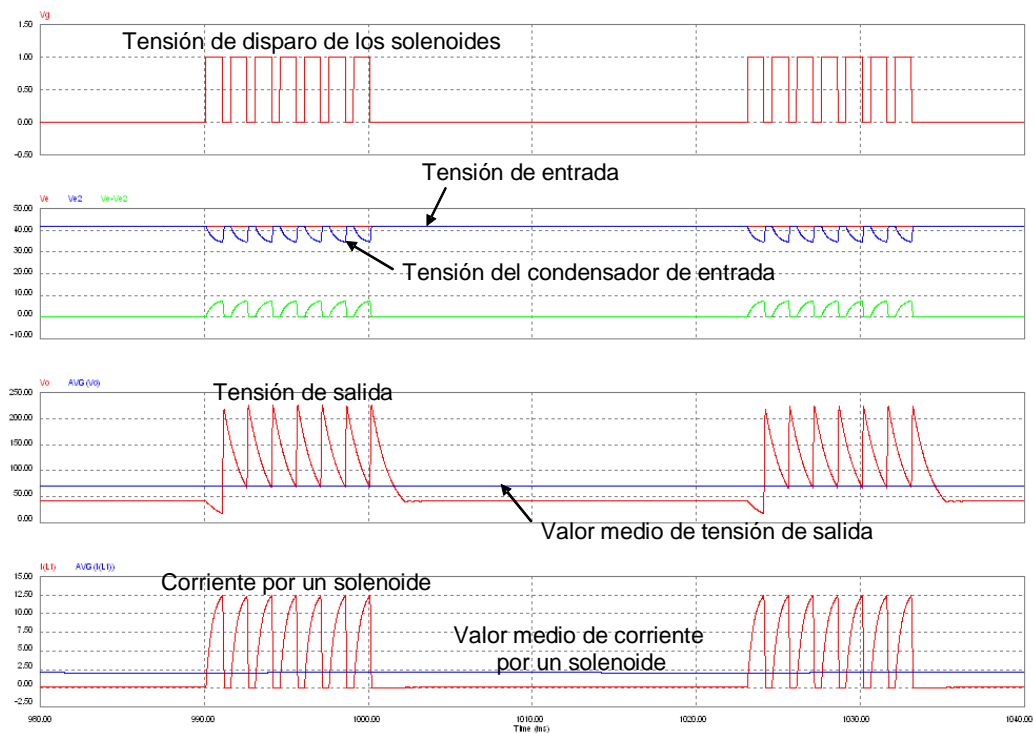


Figura 4.16. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $1 \mu\text{F}$, condensador de salida $47 \mu\text{F}$, resistencia de carga 25Ω , tensión media de salida 70 V , potencia media disipada en la carga 299 W

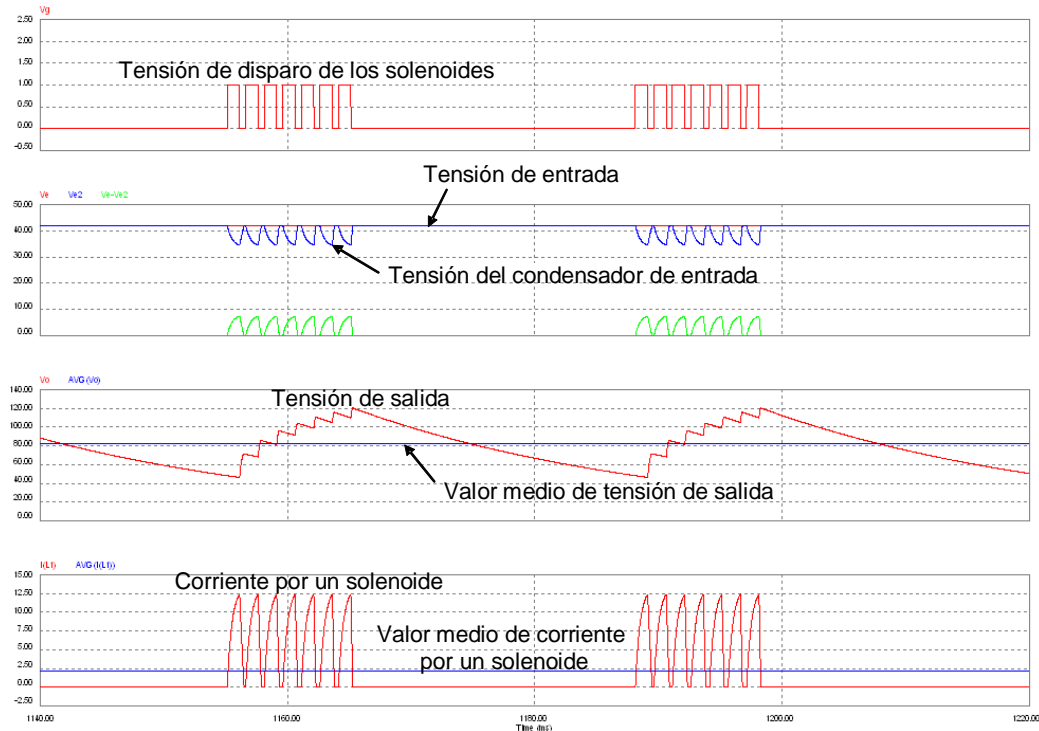


Figura 4.17. Formas de onda más significativas obtenidas al emplear la topología elevadora con los siguientes valores del circuito: condensador de entrada $1 \mu\text{F}$, condensador de salida $1000 \mu\text{F}$, resistencia de carga 25Ω , tensión media de salida 82 V , potencia media disipada en la carga 289 W

La variación del condensador de salida tiene un efecto directo sobre el rizado de la tensión de salida del circuito elevador. Las conclusiones que se pueden extraer al variar este parámetro son similares a las que se obtuvieron al variar la resistencia de carga:

- Del mismo modo que sucedía al aumentar la carga, si se aumenta el valor del condensador de salida la constante de tiempo $\tau = R_{carga} \cdot C_0$ también se ve incrementada. Esto supone que la descarga del condensador se haga de forma más lenta y el valor medio de la tensión de salida sea mayor, estando en riesgo de no cumplir con la normativa de baja tensión.
- Si por el contrario, el valor del condensador es muy pequeño, la carga del mismo se hace muy rápida, llegando a alcanzarse picos de tensión bastante elevados (550 V para un condensador de salida de 4,7 μF y 120 V para un condensador de 1000 μF). Por lo tanto, a pesar de incrementarse la velocidad de desmagnetización del solenoide debido a las altas tensiones inversas que se le aplican, esto supondría un aumento considerable del tamaño del condensador.

VARIACIÓN DEL PAR CONDENSADOR DE SALIDA Y RESISTENCIA DE CARGA

Como se ha comentado, al variar tanto el condensador de salida como la resistencia de carga, se produce una variación de la constante de tiempo definida por $\tau = R_{carga} \cdot C_0$.

En el siguiente análisis se ha estudiado el comportamiento del sistema al variar ambos parámetros simultáneamente, tomando como condición que no se superen los valores de tensiones impuestos por el reglamento de baja tensión. En la *tabla 4.2* se han extraído los datos más significativos del análisis con *PSIM*. Estos datos son la tensión media en la resistencia de carga, la tensión de pico en la resistencia de carga y las potencias medias entregadas por la fuente y consumidas por la carga.



Tabla 4.2. Pares de valores de condensador de salida y resistencia de carga para llegar al límite del Reglamento de Baja Tensión (valor medio de tensión menor de 75V), con el condensador de entrada fijado en 1 μ F

Resistencia de carga (Ω)	Condensador de salida (μ F)	Tensión media de salida (V)	Tensión de pico de salida (V)	Potencia de entrada (W)	Potencia en la carga (W)
20	50	65	213	1070	313
20	100	68	171	1080	316
20	500	72	132	1090	310
20	1000	74	115	1100	300
25	50	71	220	1050	300
25	100	74	182	1060	302
30	30	72	267	1040	287
30	38	75	250	1040	289
35	4,7	52	600	1000	248
35	10	63	433	1010	265
35	25	75	295	1020	278
40	12	70	407	1010	264
40	15	74	370	1010	268
45	10	71	445	1000	258
45	12	75	409	1000	260
50	8	72	497	1000	250
50	10	75	445	1000	254
55	6	69	572	990	241
55	8	75	488	990	247
60	5	69	616	990	234
60	6	74	568	990	239

A la vista de los resultados recogidos en la *tabla 4.2*, se extraen las siguientes conclusiones:

- La potencia requerida a la fuente no cambia demasiado entre unos pares y otros, variando entre 990 W a 1070 W.
- El valor mínimo de potencia disipada en la carga (234 W) se consigue para la mayor resistencia de carga. Este resultado es lógico ya que a mayor resistencia menores

corrientes circulan y de este modo la potencia consumida por la resistencia de carga también se ve reducida.

- Las tensiones de pico alcanzadas en el condensador de salida, que a su vez las tiene que soportar el interruptor principal, son más elevadas cuanto más grande es el valor de resistencia. Esto implica que aunque una resistencia de carga de $60\ \Omega$ reduce pérdidas, produce tensiones de pico demasiado altas (616 V).

Desde este punto de vista, un diseño muy adecuado sería una resistencia de carga igual a $35\ \Omega$ y un condensador de salida de $25\ \mu\text{F}$, puesto que se podría utilizar un MOSFET de menos de 350 V de tensión de pico y la potencia total disipada en la carga sería de 278 W.

4.5.3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Además del análisis de sensibilidad mediante simulación, se han realizado una serie de ensayos experimentales para todas las topologías analizadas que corroboran el correcto funcionamiento del circuito. Dichas medidas se han tomado mediante una plataforma de ensayos (ver *Anexo 3*) fabricada utilizando la herramienta comercial *PSPICE*.

En la *figura 4.18* se representa el resultado de aplicar tres pulsos de disparo de la misma duración que los que se emplearon para la simulación, es decir, de 0,8 ms. Con esta secuencia de control se puede apreciar claramente que la corriente por el solenoide se anula siempre antes de aplicar el siguiente pulso. También se observa el aspecto negativo comentado anteriormente de los picos en la tensión de salida producidos en el instante de la desmagnetización.

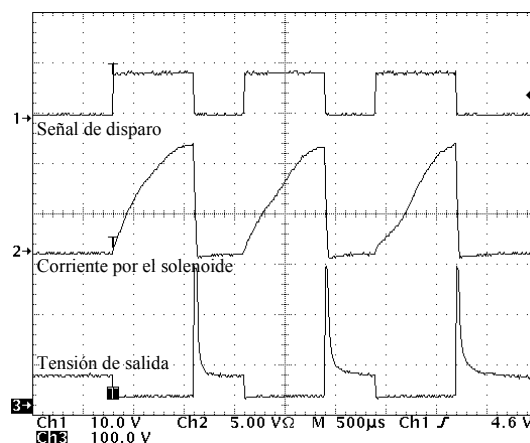


Figura 4.18. Formas de onda más representativas del elevador obtenidas en plataforma de ensayos



4.5.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA TOPOLOGÍA ELEVADORA

A continuación se resumen las principales conclusiones del análisis de la topología elevadora:

- El tiempo de desmagnetización se acorta significativamente respecto al del accionador original (de aproximadamente 4 ms a tiempos inferiores a 0,5 ms), de modo que se comprueba que es viable la posibilidad de secuenciar el disparo de los solenoides.
- Puede asegurarse el cumplimiento de la normativa de baja tensión y controlarse la tensión máxima que debe soportar el interruptor principal mediante un adecuado diseño del par condensador de salida y resistencia de carga.
- Aparte de las inevitables pérdidas en los solenoides hay un único foco de calor, que está localizado: la resistencia de carga, que disipa en torno a 300 W.
- Comparado con el circuito original, esta topología presenta escasa complejidad adicional. En cuanto al número de componentes se necesita únicamente añadir dos componentes pasivos: la capacidad de salida y la resistencia de carga. Por tanto es de esperar que sea igual de fiable que la topología original.
- Podría existir alguna dificultad desde el punto de vista constructivo, concretamente en el trazado de la placa de circuito impreso, ya que hay que conducir las corrientes de cada solenoide hacia una única pareja de resistencia y condensador. No obstante, este obstáculo podría superarse diseñando un circuito elevador por cada solenoide, lo cual permitiría repartir los pares resistencia-condensador por toda la placa. De este modo la potencia disipada por cada resistencia sería bastante inferior y su repercusión en el trazado de la placa sería mucho menor.

4.6. TOPOLOGÍA ELEVADORA CON REUTILIZACIÓN DE ENERGÍA

En la *figura 4.19* se representa el esquema de la topología elevadora con reutilización de la energía. Esta topología consiste básicamente en un convertidor elevador con un convertidor reductor situado a la salida, en lugar de la resistencia de carga. Por otra parte se observa que la salida del reductor se conecta directamente a la entrada del elevador.

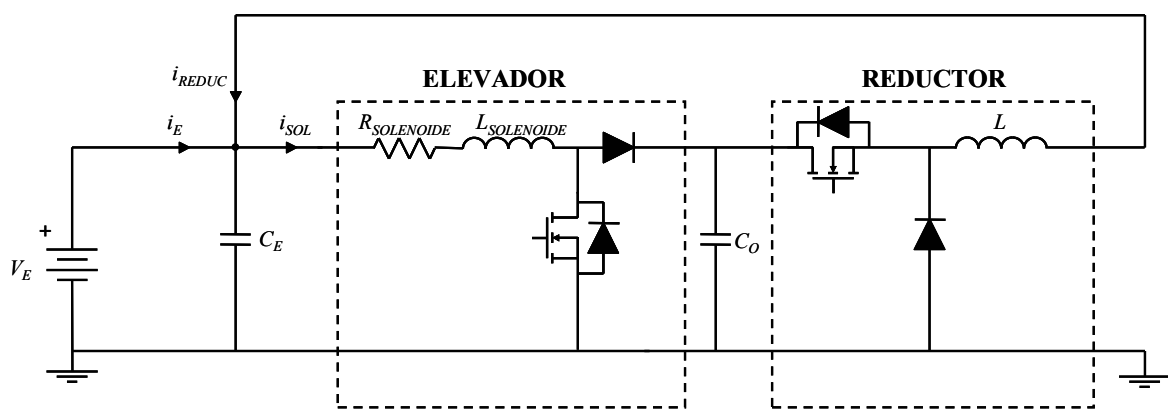


Figura 4.19. Esquema de la topología elevadora con reutilización de energía

Las dos principales razones por las que se propone el estudio de este circuito son:

- En primer lugar se trata de mantener los reducidos tiempos de desmagnetización conseguidos con el convertidor elevador pero sin disipar energía. Para ello, se pretende recircular la energía que disiparía la resistencia de carga situada a la salida del circuito elevador.
- En segundo lugar, se pretende aprovechar la energía devuelta a la fuente para atender a las elevadas corrientes instantáneas demandadas por los solenoides, con lo que se conseguiría reducir el tamaño del condensador de entrada C_E , que está situado en paralelo con la propia fuente para aumentar su capacidad de ceder corriente.

Antes de comenzar el análisis de este circuito, se ha de tener en cuenta que la fuente de tensión ideal que se emplea en la simulación no representa fielmente el



funcionamiento de la fuente real, ya que es capaz de atender sin problemas a cualquier demanda instantánea de corriente de los solenoides, cuando en la realidad esto no es así.

4.6.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Los aspectos más importantes del funcionamiento de este circuito son los siguientes:

- La fuente de alimentación (V_E) de 42 V debe elegirse para ser capaz de proporcionar en régimen permanente la potencia media demandada por los solenoides.
- El consumo de potencia mayoritario se concentra en los solenoides. Esta disipación de potencia se produce solo durante el disparo de los solenoides y supone unos valores de potencia instantánea muy superiores a la potencia media.
- Aún suponiendo que la tensión de entrada no se reduce en exceso al conducir los solenoides, se pone de manifiesto el siguiente desequilibrio energético: La fuente de tensión de entrada de 42 V ha de ser capaz de proporcionar el valor medio de la corriente que demandan los solenoides al promediar en una secuencia de disparo completa. Sin embargo, la demanda instantánea de corriente de los solenoides es muy superior a la corriente media o corriente continua que es capaz de proporcionar la fuente de 42 V. Es el condensador de entrada C_E quien debe asumir la diferencia de corrientes sin que su tensión se reduzca en exceso durante los picos de consumo que provocan los solenoides. Para ello, el valor de su capacidad ha de ser elevado, lo cual implica un inevitable aumento de su volumen y su coste.
- La desmagnetización de los solenoides transfiere, por cada tren de pulsos de disparo de los solenoides, una cantidad importante de energía que ha de ser almacenada en C_O .
- La energía asociada a la desmagnetización, que es la que finalmente se transfiere a C_O , siempre es menor que la energía total que demandan los solenoides. En consecuencia, la energía que se transfiere a C_O es siempre inferior a la que consumen los solenoides y también lo será la energía que es capaz de transferir el convertidor reductor.

- Para que el convertidor reductor contribuyese de manera significativa a la reducción de tamaño del condensador de entrada C_E , la corriente instantánea que debería proporcionar la inductancia L del circuito reductor tendría que ser comparable a la que consumen los solenoides y además producirse sin retraso respecto a dicho consumo de corriente. En la *figura 4.20* se representan las corrientes en el nodo de entrada. Por otra parte, en la *figura 4.21* se puede observar que la corriente que aporta el reductor es más reducida y además está prácticamente en contrafase con la que demandan los solenoides.

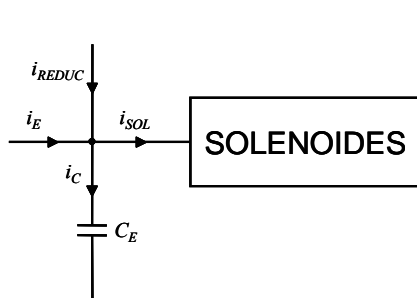


Figura 4.20. Corrientes convergentes a la entrada del convertidor elevador

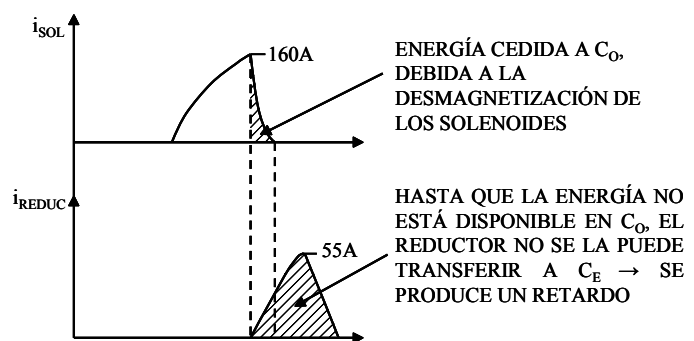


Figura 4.21. Formas de onda de la corriente por los solenoides y por el reductor

4.6.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Teniendo en cuenta el funcionamiento de la topología, se establecen como parámetros más influyentes en el comportamiento del sistema los siguientes:

- Condensador de salida, C_O .
- Inductancia de la bobina del reductor, L .

A continuación se proporciona una breve explicación de la sensibilidad del circuito ante variaciones de cada una de estas variables.

Es importante señalar que la frecuencia de conmutación del convertidor reductor es de 10 kHz, mientras que la frecuencia de la secuencia de disparo de los solenoides es sumamente inferior (30,30 Hz).

Es importante señalar que la frecuencia de conmutación del convertidor elevador es de 30,30 Hz, mientras que la de la etapa reductora es aproximadamente 330 veces mayor ($f=10$ kHz). De esta manera se consigue una frecuencia de muestreo lo suficientemente grande para asegurar la correcta transferencia de energía.

VARIACIÓN DEL CONDENSADOR DE SALIDA DEL ELEVADOR, C_O

En las figura 4.22 y figura 4.23 se puede apreciar cómo afecta la variación del condensador C_O al comportamiento del sistema. Por una parte se observa que el aumento del condensador hace más lenta la evolución de la tensión, lo que causa una desmagnetización más lenta (ver corriente por los solenoides).

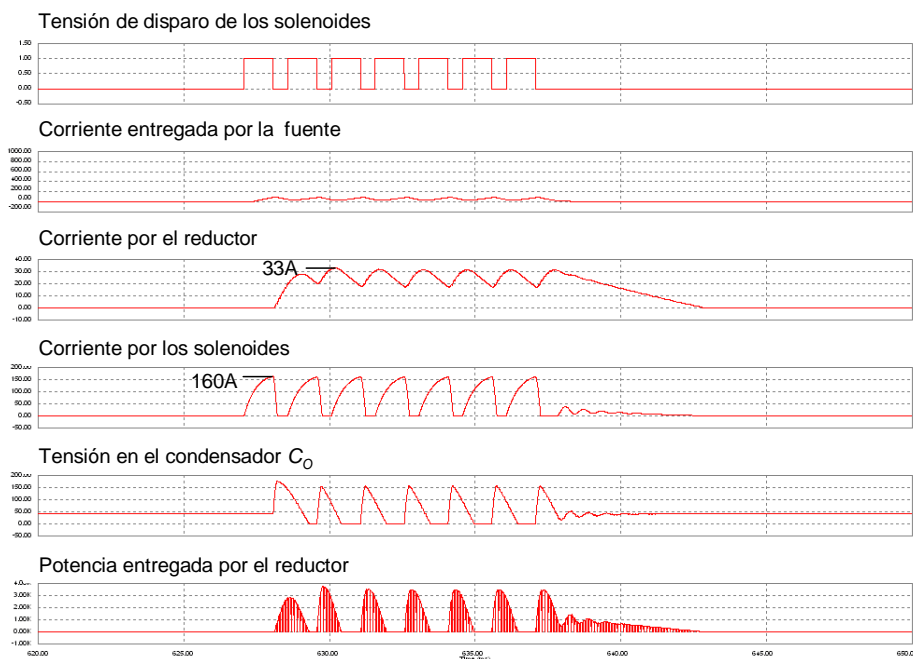


Figura 4.22. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_O=100 \mu F$, inductancia de la bobina del reductor $L=2$ mH

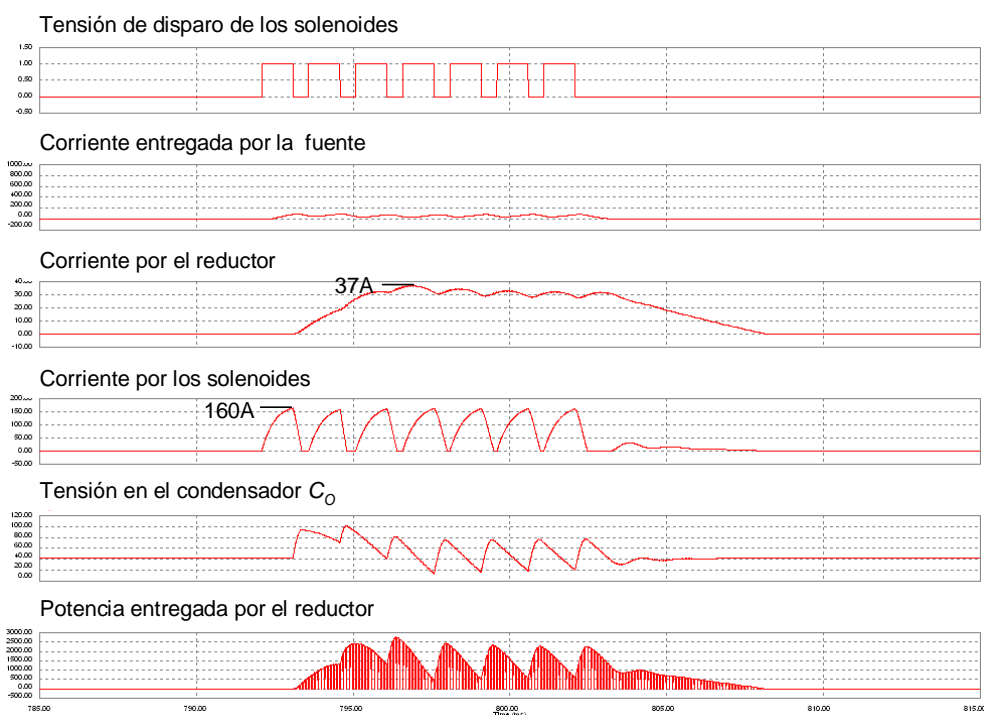


Figura 4.23. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_0=470 \mu F$, inductancia de la bobina del reductor $L=2 \text{ mH}$

Un incremento del condensador C_0 hace más lenta la evolución de la tensión, con lo que los picos de tensión máxima que ha de soportar el mismo son menores. Por otra parte, disminuyen las tensiones de desmagnetización, lo que hace más lenta la desmagnetización del solenoide (el tiempo límite de desmagnetización de 0,5 ms). Esto supone que el área de desmagnetización sea mayor, aumentando la cantidad de energía que es capaz de transferir el reductor.

VARIACIÓN DE LA INDUCTANCIA DE LA BOBINA DEL REDUCTOR, L

El aumento de la inductancia L supone menores picos de corriente máxima por la bobina, ya que la pendiente de esta corriente viene dada por:

$$\frac{V_{O \text{ elevador}} - V_{O \text{ reductor}}}{L}$$

Los efectos de la variación de la bobina del reductor se pueden observar comparando la figura 4.24 con la figura 4.25. Como se puede apreciar, el aumento de la bobina hace más lenta la evolución de la corriente por la bobina del reductor, lo que

significa mayores corrientes medias para devolver al condensador de entrada. Sin embargo, también supone menores corrientes máximas instantáneas.

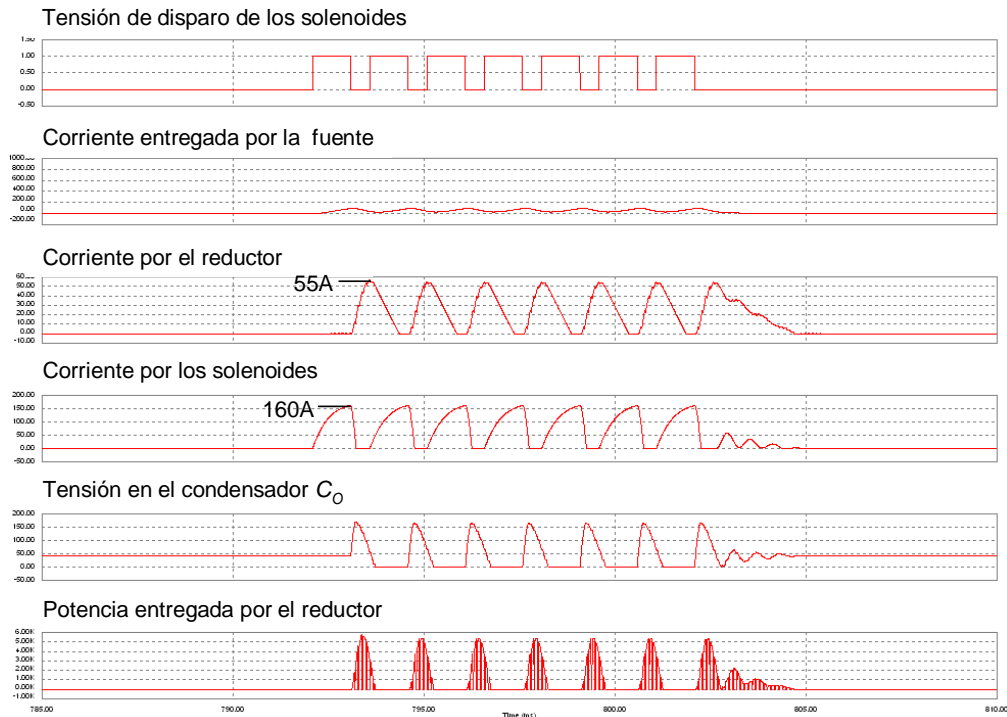


Figura 4.24. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_0=100 \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=0.5 \text{ mH}$

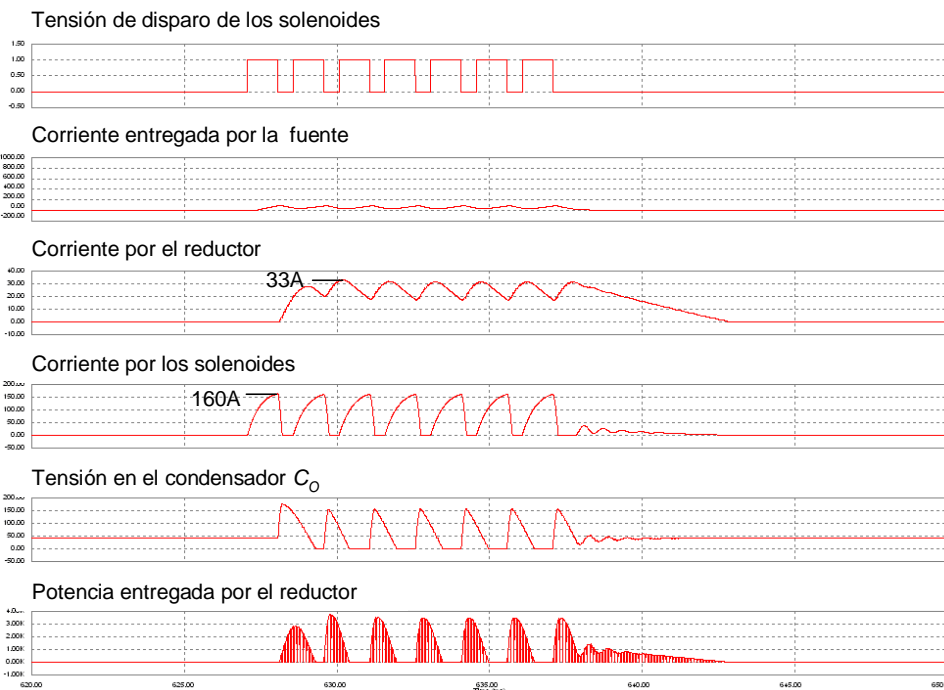


Figura 4.25. Formas de onda más significativas del elevador con reutilización de energía, obtenidas con los siguientes valores del circuito: Condensador de salida $C_0=100 \mu\text{F}$, inductancia de la bobina del reductor $L=2 \text{ mH}$

4.6.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA TOPOLOGÍA ELEVADORA CON REUTILIZACIÓN DE ENERGÍA

En la *tabla 4.3* se encuentran representados los valores numéricos más representativos de las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad del circuito elevador con reutilización de energía. Los parámetros que se muestran son:

$T_{\text{desmag. solenoide}}$: Tiempo de desmagnetización del solenoide.

$i_{\text{E instant.}}$: Corriente entregada por la fuente en los instantes en los que los solenoides demandan más corriente.

$i_{\text{Reduc. instant.}}$: Corriente devuelta por el convertidor reductor en los instantes en los que los solenoides demandan más corriente.

$i_{\text{SOL max}}$: Corriente máxima consumida por todos los solenoides.

$\overline{i_{\text{E}}}$: Corriente media entregada por la fuente.

$\overline{i_{\text{Reduc.}}}$: Corriente media devuelta por el reductor a la entrada.

$\overline{i_{\text{SOL}}}$: Corriente media consumida por todos los solenoides.

$\overline{P_{\text{E}}}$: Potencia media entregada por la fuente.

$P_{\text{Reduc. max}}$: Potencia instantánea máxima entregada por el reductor.

Tabla 4.3. Valores más significativos del circuito elevador con reutilización de energía

C_o	L	$T_{\text{desmag. solenoide}}$	$i_{\text{E instant.}}$	$i_{\text{Reduc. instant.}}$	$i_{\text{SOL max}}$	$\overline{i_{\text{E}}}$	$\overline{i_{\text{Reduc.}}}$	$\overline{i_{\text{SOL}}}$	$\overline{P_{\text{E}}}$	$P_{\text{Reduc. max}}$
100μF	0,5mH	0,15ms	92A	0A	162A	42A	19A	61A	808w	5,6Kw
100μF	2mH	0,19ms	86A	18A	162A	32A	16A	48A	804w	3,7Kw
470μF	2mH	0,44ms	78A	32A	162A	34A	18A	52A	860w	2,8Kw

A continuación se enumeran las conclusiones más significativas extraídas del análisis del elevador con reutilización de energía:

- La recirculación de energía contribuye a las necesidades de corriente media de los solenoides, pero no a las demandas de corriente instantáneas. Ni siquiera aumentando el tamaño de los componentes del convertidor reductor se cumpliría este objetivo, ya que la máxima energía que se podría reutilizar sería la que se transfiere en la desmagnetización de los solenoides, la cual no sería suficiente. Además, la corriente devuelta por el convertidor reductor sufre un desfase con respecto a la corriente que circula por los solenoides debido a que el condensador C_O tarda un tiempo en almacenar la energía antes de poder devolverla.
- A priori esta configuración es idealmente no disipativa debido a la supresión de la resistencia de carga del convertidor elevador. Sin embargo, el nuevo convertidor reductor tiene que ser capaz de transferir una potencia de pico (potencia instantánea) muy superior a la potencia media asociada a la desmagnetización. Esto supone un incremento de las pérdidas en los semiconductores, además de un notable incremento de las sollicitaciones eléctricas en éstos, incluidas las del condensador C_O y de la bobina del convertidor reductor.

Teniendo en cuenta las características extraídas del análisis de la topología elevadora con reutilización de energía, se concluye que la corriente que devuelve el reductor siempre será inferior en valor instantáneo e irá retrasada respecto a la intensidad instantánea que consumen los solenoides. Es decir, no se cumple el objetivo de ayudar a reducir el tamaño del condensador de entrada C_E .

4.7. CONVERTIDOR DIRECTO CON DOBLE INTERRUPTOR

La siguiente alternativa que se ha estudiado como posible solución es la topología directa con doble interruptor, cuyo esquema se muestra en la *figura 4.26*. La ventaja de esta topología es que conlleva la recuperación de la energía asociada a la desmagnetización del solenoide, mientras que su principal desventaja es el diseño del accionador (“*driver*” en la *figura 4.26*) del interruptor de la parte superior, cuyo disparo no está referido a la masa del circuito (nodo *A* en la *figura 4.26*).

Una posible solución para el diseño del “*driver*” que permita el disparo del transistor superior con respecto de la masa general implicaría el uso de transistores bipolares en el convertidor directo con doble interruptor, ya que son disparados por corriente y no por tensión. Esta solución es posible porque la frecuencia de

funcionamiento del sistema es además bastante baja (30,30 Hz), y por lo tanto adecuada para el uso de transistores bipolares.

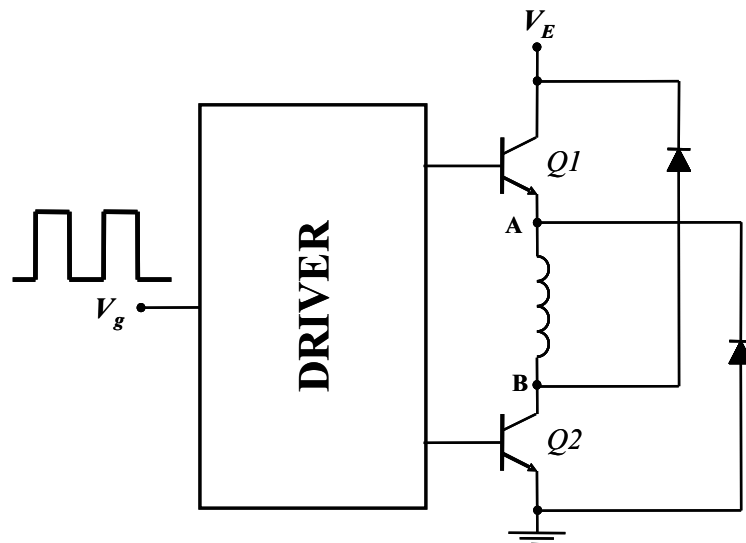
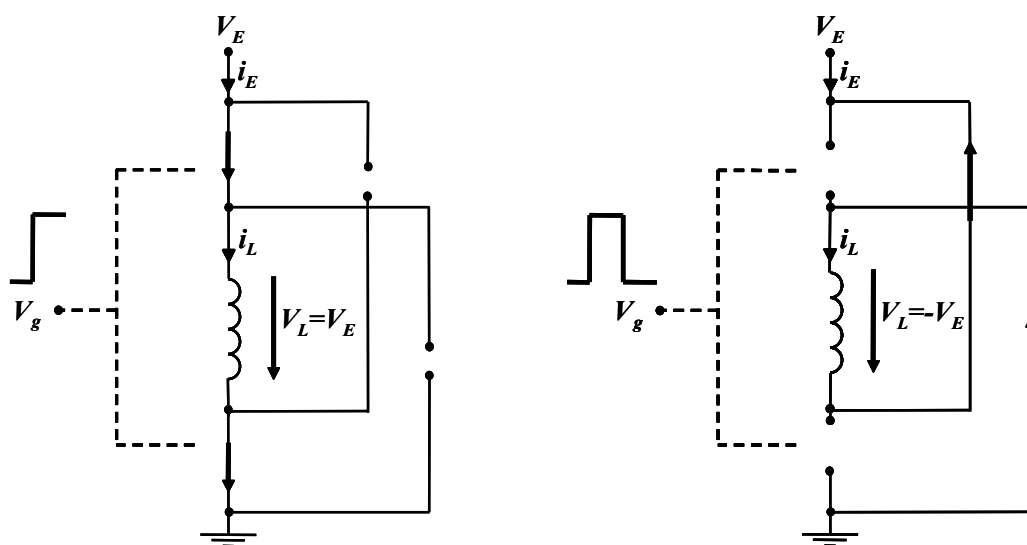


Figura 4.26. Topología del convertidor directo con doble interruptor

4.7.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

En la figura 4.27 se representa el esquema equivalente del convertidor dependiendo del estado de conmutación de los interruptores. Cuando los interruptores principales están cerrados (figura 4.27a) el solenoide almacena energía, y cuando se abren la energía almacenada se devuelve a la fuente a través de los diodos (figura 4.27b).



a. Circuito equivalente durante la magnetización del solenoide

b. Circuito equivalente durante la desmagnetización del solenoide

Figura 4.27. Funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor

Las formas de onda teóricas de corriente más importantes pueden observarse en la *figura 4.28*, donde i_L es la corriente por la bobina del solenoide e i_E es la corriente saliente de la fuente. Al aplicar al solenoide el mismo valor de tensión para magnetizarlo y desmagnetizarlo, se podría esperar que el tiempo de carga y descarga sea el mismo.

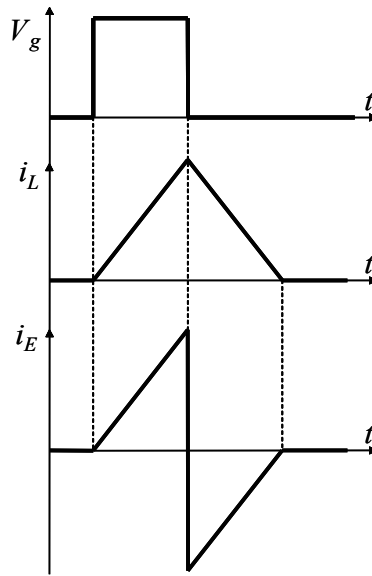


Figura 4.28. Formas de onda más significativas del funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor

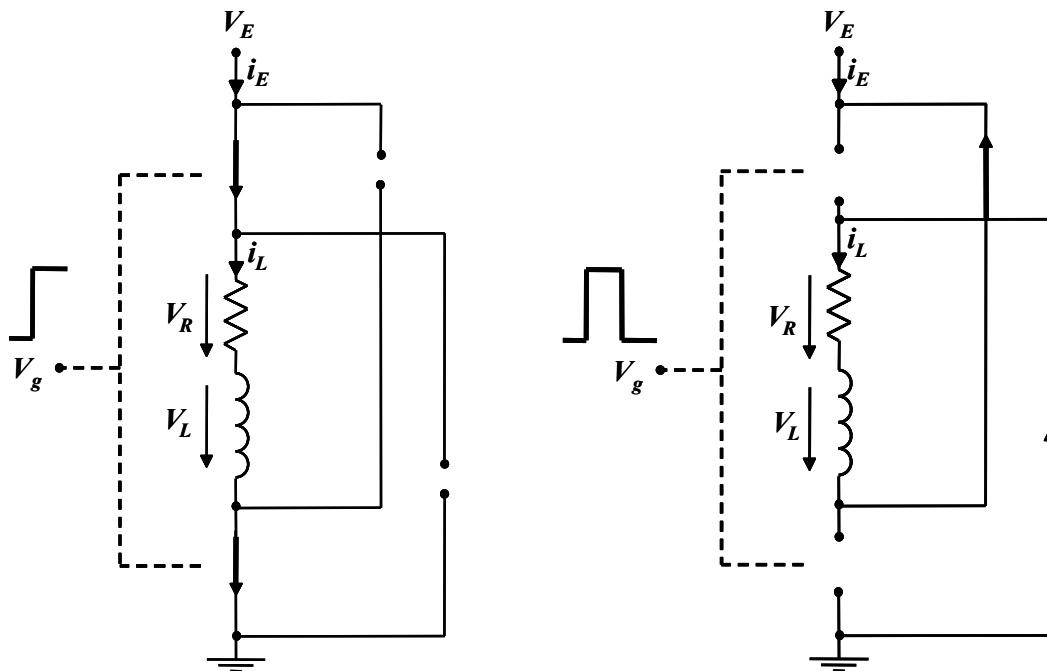
Sin embargo, en realidad el tiempo de desmagnetización es menor que el esperado. Esto es debido a la presencia de la resistencia parásita del solenoide. En la *figura 4.29* se muestran los circuitos equivalentes durante el proceso de magnetización y desmagnetización del solenoide teniendo en cuenta el efecto de su resistencia parásita.

Durante la magnetización de la bobina del solenoide (*figura 4.29a*), la expresión de la tensión despreciando las caídas en los semiconductores es:

$$V_L = V_E - V_R \quad (4.1)$$

Sin embargo, durante el proceso de desmagnetización (*figura 4.29b*), la tensión inversa que se le aplica es mayor que durante el proceso de magnetización, porque la caída de tensión en la resistencia contribuye a aumentarla. Su expresión despreciando la caída de los semiconductores es:

$$V_L = -V_E - V_R \quad (4.2)$$



a. Circuito equivalente durante la magnetización del solenoide

b. Circuito equivalente durante la desmagnetización del solenoide

Figura 4.29. Funcionamiento del convertidor directo con doble interruptor teniendo en cuenta la influencia de la R parásita del solenoide

En la figura 4.30 se ha representado la tensión de disparo de un solo solenoide, la corriente por el mismo y la corriente de entrada i_E . El tiempo empleado en la magnetización del mismo es de 0,8 ms, mientras que el tiempo de desmagnetización se reduce hasta 0,29 ms.

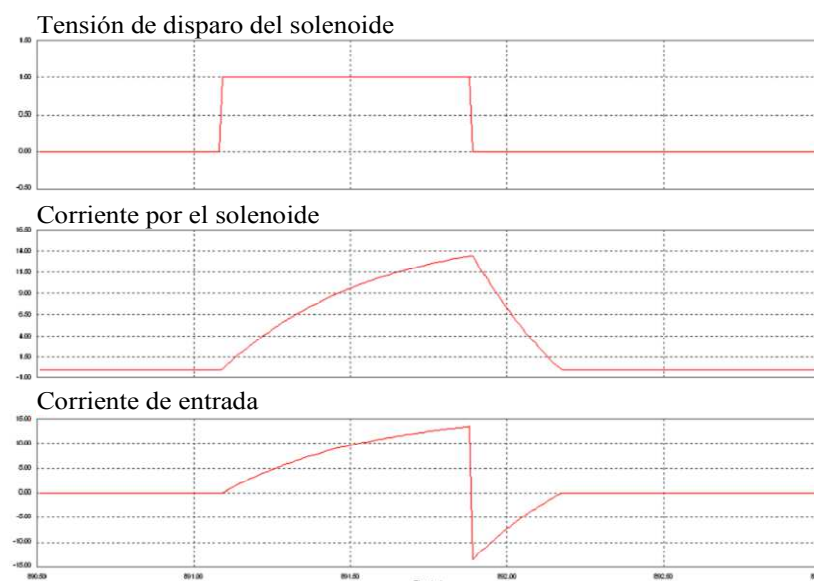


Figura 4.30. Corriente de entrada y corriente por el solenoide al aplicar un pulso en el convertidor directo con doble interruptor: tiempo de magnetización 0,8 ms y tiempo de desmagnetización 0,29 ms

Las formas de onda más significativas de esta topología (tensión de disparo y corriente por los solenoides), teniendo en cuenta el tren de disparos que recibe un solenoide, se hallan representadas en la *figura 4.31*. También se han representado las tensiones que han de soportar los semiconductores, de modo que su valor máximo siempre es igual a la tensión de entrada (42 V). La potencia de entrada que ha de ser capaz de suministrar la fuente con esta configuración es de 850 W (suponiendo ideales los semiconductores empleados).

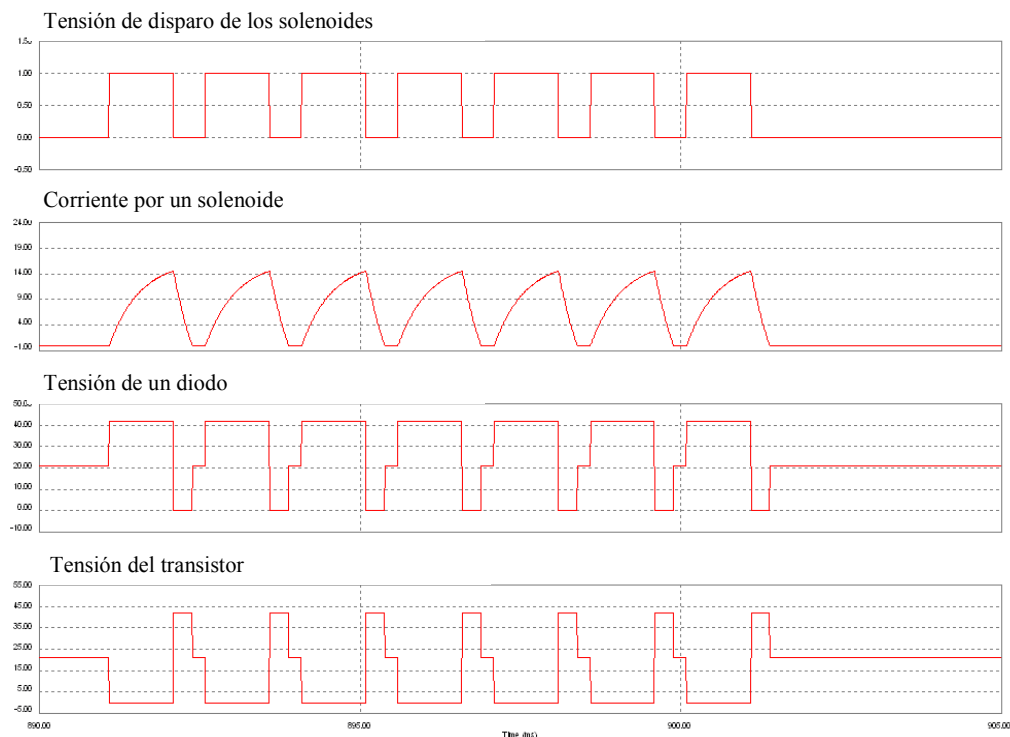


Figura 4.31. Formas de onda más significativas para el convertidor directo con doble interruptor

4.7.2. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Se ha realizado una comprobación experimental del funcionamiento del circuito convertidor con doble interruptor a través de una plataforma de ensayos (ver *Anexo 3*).

Tras el análisis basado en simulación, se muestran a continuación las formas de onda más representativas tomadas mediante la plataforma de ensayos.

En la *figura 4.32* se observa la forma de corriente por el solenoide al emplear un disparo secuencial formado por tres pulsos consecutivos. Se recuerda que un mismo solenoide no recibe varios disparos consecutivos, sino que cada pulso se aplica a un

solenoide diferente. No obstante, de esta manera se demuestra que los tiempos de desmagnetización son suficientemente pequeños, alcanzando la desmagnetización del solenoide antes del siguiente proceso de magnetización. De esta forma, se corrobora la validez del disparo secuencial impuesto en las simulaciones.

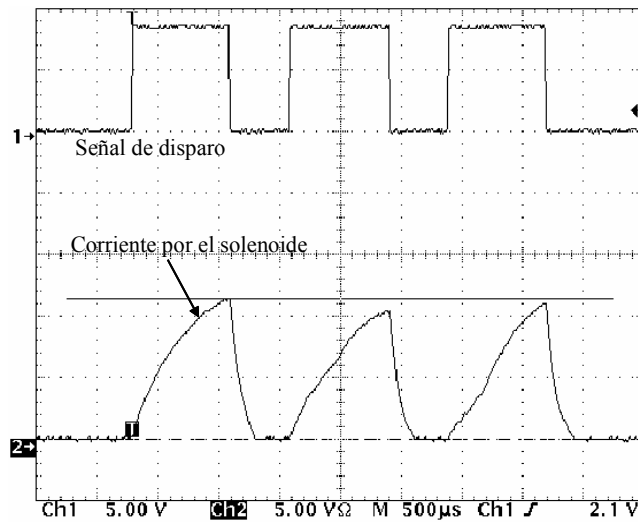


Figura 4.32. Forma experimental de corriente por el solenoide en el convertidor directo con doble interruptor al aplicar 3 pulsos de disparo consecutivos

En la figura 4.33 se observa que en el instante en que el pulso de disparo está a nivel alto, los transistores conducen. Por el contrario, en el instante en que la señal de disparo pasa a valer 0 V, los transistores se cortan y es en este momento cuando los diodos comienzan a conducir, produciéndose la desmagnetización del solenoide.

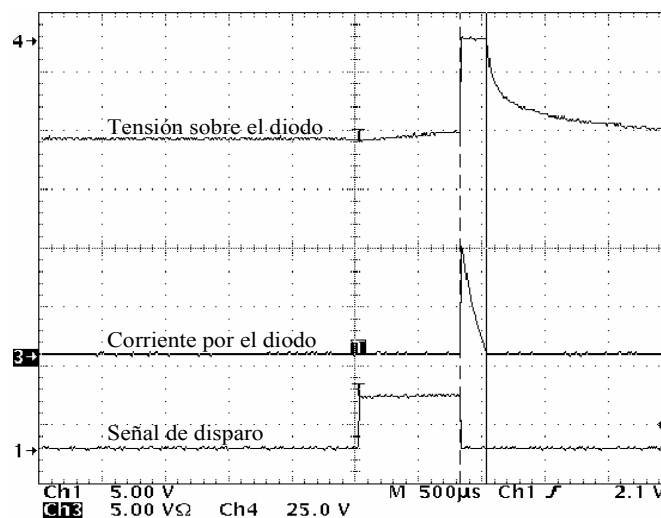


Figura 4.33. Forma experimental de tensión y corriente por los diodos de desmagnetización en el convertidor directo con doble interruptor al aplicar un pulso de disparo

En la *figura 4.34* se pueden ver las tensiones en los principales puntos del circuito junto con la corriente por el solenoide. En efecto, la tensión máxima soportada por los componentes es la que se obtuvo mediante simulación. Es decir, tanto los transistores como los diodos han de soportar tensiones máximas iguales a la tensión de entrada (42 V).

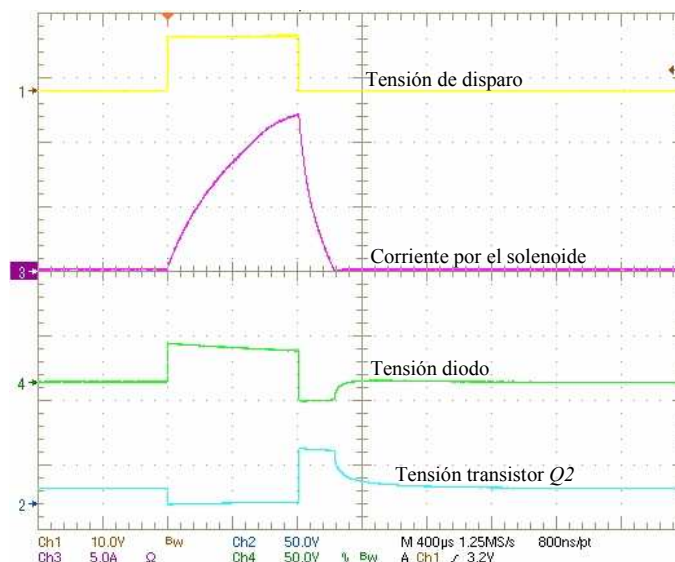


Figura 4.34. Principales tensiones en el convertidor directo con doble interruptor y corriente por el solenoide

4.7.3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL CONVERTIDOR DIRECTO CON DOBLE INTERRUPTOR

Tras el análisis realizado del convertidor directo con doble interruptor se han extraído las siguientes conclusiones:

- El tiempo de desmagnetización es menor que en el circuito original porque el solenoide se desmagnetiza aplicando la tensión de entrada del convertidor (más las dos caídas en directa de los dos diodos).
- Al igual que en el circuito original, no existen más focos de calor que los propios solenoides.
- Este circuito necesita sólo un diodo y un transistor más que el circuito original por cada uno de los solenoides. Sin embargo, su mayor inconveniente está en la complejidad del circuito de disparo del interruptor que ocupa la posición superior y

que requiere una fuente aislada de masa. Esto supone el diseño de un accionador adicional por cada uno de los solenoides, perjudicando el coste del circuito y su fiabilidad.

- Las tensiones medias aplicadas en todos los puntos son menores que los 42 V de la entrada, por lo que en todos los casos se cumple con el reglamento de baja tensión. Las tensiones aplicadas a los semiconductores también son menores que 42 V en todos los casos, por lo que se conseguirán tamaños reducidos de los mismos.
- El interés de esta solución sería mayor en las impresoras tipo impacto de uso personal, con un menor número de solenoides, sobre todo si se consigue que el accionador de los interruptores sea sencillo y robusto.

4.8. TOPOLOGÍA CON RED DE DESMAGNETIZACIÓN RD

Una vez analizadas dos soluciones con recirculación de energía (topología elevadora con convertidor reductor y convertidor directo con doble interruptor), se analiza otra alternativa que proporciona ciertas mejoras respecto a la topología original (topología con diodo en antiparalelo con el solenoide) y además es más sencilla que las soluciones no disipativas. Sin embargo esta alternativa supone la disipación de energía de desmagnetización, igual que en la topología elevadora.

El efecto anteriormente descrito de la reducción del tiempo de desmagnetización debido a la resistencia parásita del solenoide (*ver apartado 4.6.1.*) también está presente en el circuito original de la impresora (*figura 4.35*), pero es menos notorio debido a la baja tensión aplicada durante la desmagnetización (la tensión directa del diodo V_γ). Sin embargo, la desmagnetización de la bobina es más rápida de lo que se podía prever, porque se descarga aplicando la tensión directa del diodo más la caída de tensión en la resistencia parásita, R_{Sol} .

La siguiente solución consiste simplemente en añadir al circuito original una nueva resistencia en serie con el diodo con el propósito de acelerar el proceso de descarga.

En la *figura 4.36* se ha representado el esquema de esta topología, donde R_{Sol} representa la resistencia parásita del solenoide y R_{Desmag} la resistencia que se ha añadido en serie con el diodo de desmagnetización.

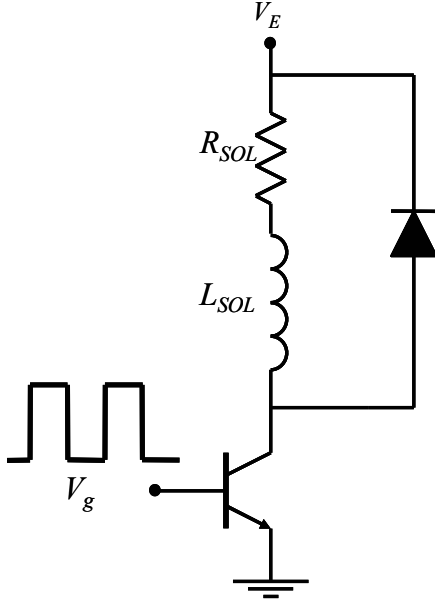


Figura 4.35. Topología original de magnetización y desmagnetización del solenoide

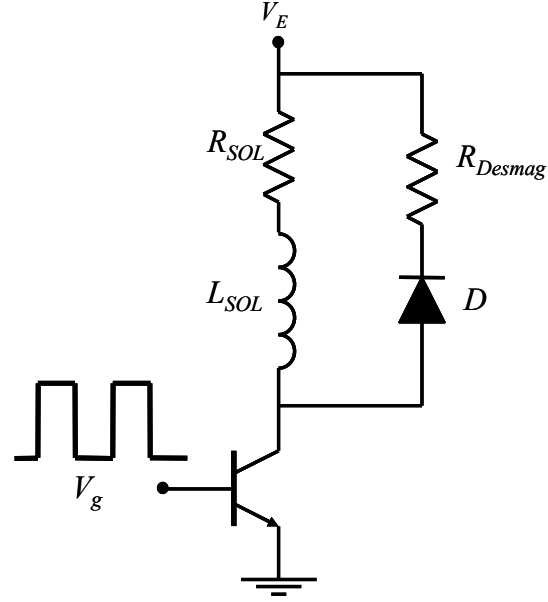


Figura 4.36. Topología con red de desmagnetización RD

4.8.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El circuito funciona de forma que durante la magnetización (ver *figura 4.37a*), la tensión aplicada al solenoide (V_L) despreciando las caídas en los semiconductores es:

$$V_L = V_E - V_R \quad (4.3)$$

Sin embargo, durante el proceso de desmagnetización (ver *figura 4.37b*) la expresión para calcular la tensión inversa, considerando la caída de tensión del diodo en directa (V_γ) es:

$$V_L = -V_\gamma - V_{Rdesmag} - V_R \quad (4.4)$$

Por lo tanto, el valor de la resistencia de desmagnetización R_{Desmag} va a influir decisivamente en el tiempo de desmagnetización del solenoide.

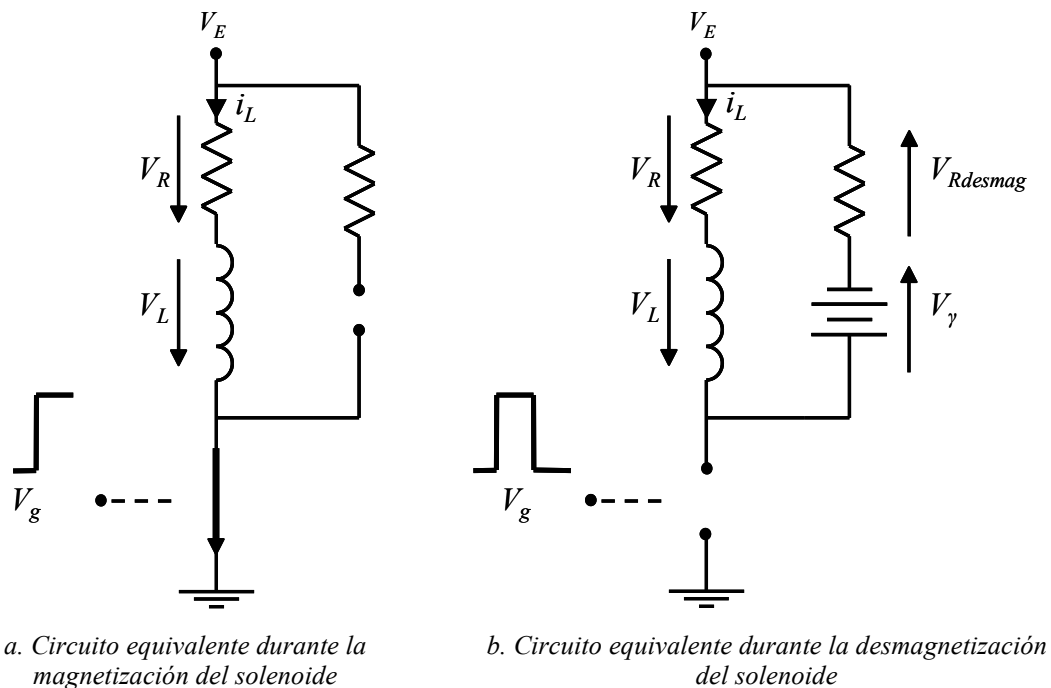
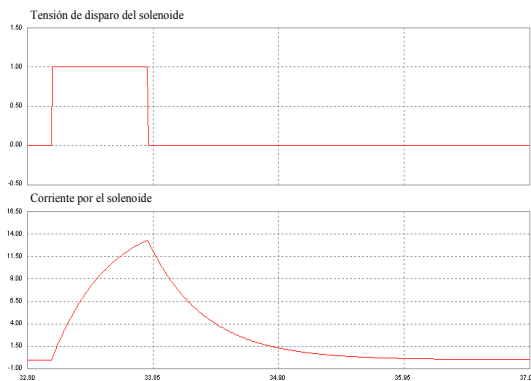


Figura 4.37. Funcionamiento de la topología con desmagnetización mediante diodo y resistencia

4.8.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

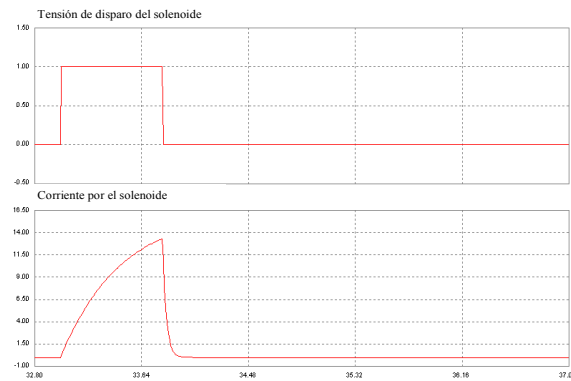
Se va a realizar el análisis de este circuito buscando obtener la resistencia de desmagnetización óptima, es decir, aquella que reduzca el tiempo de desmagnetización y que a su vez no incremente en exceso las pérdidas. Sin embargo, la elección de la resistencia en serie con el diodo no puede ser arbitraria porque condiciona la tensión en los semiconductores. El objetivo es por tanto encontrar una resistencia que permita tensiones máximas en los semiconductores (diodo y transistor) lo más bajas posibles sin llegar a superar los tiempos de desmagnetización de 0,5 ms de los solenoides.

En la figura 4.38 se representa la tensión de disparo y la corriente que circula por el solenoide para las mismas condiciones de magnetización y distintas resistencias en serie con el diodo. Como era de esperar, cuanto mayor es el valor de la resistencia de desmagnetización, menor es el tiempo de desmagnetización del solenoide, llegando a reducirse este tiempo hasta valores insignificantes.



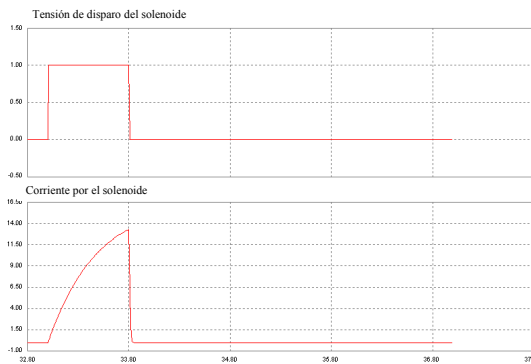
$$t_{\text{desmagnetización}} = 2,83 \text{ ms}$$

a. Sin resistencia en serie



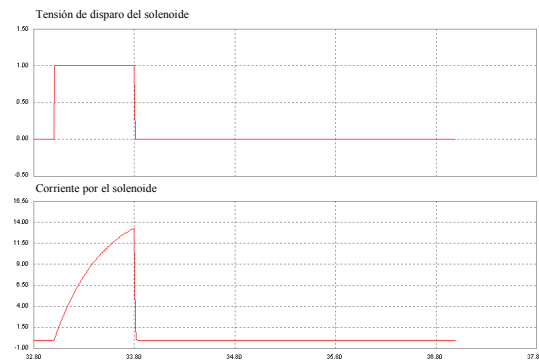
$$t_{\text{desmagnetización}} = 0,17 \text{ ms}$$

b. Con resistencia serie 40 Ω



$$t_{\text{desmagnetización}} = 0,04 \text{ ms}$$

c. Con resistencia serie 200 Ω



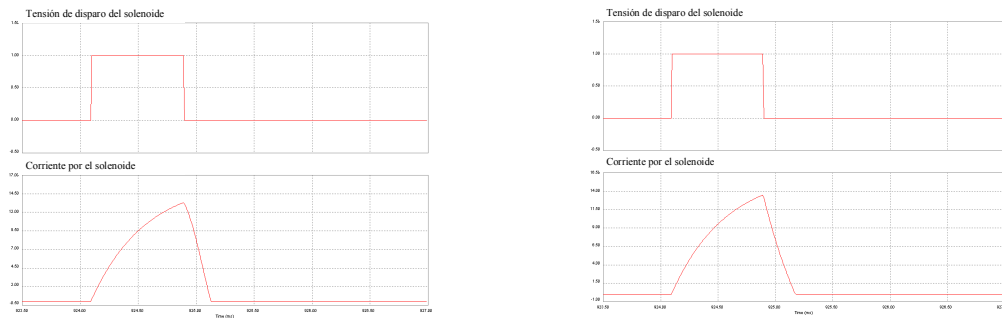
$$t_{\text{desmagnetización}} = 0,02 \text{ ms}$$

b. Con resistencia serie 1000 Ω

Figura 4.38. Corriente por el solenoide y tiempos de desmagnetización al variar la resistencia en serie con el diodo

En la figura 4.39 se representan las formas de corriente obtenidas mediante simulación en la topología elevadora y el convertidor directo con doble interruptor ante las mismas condiciones de disparo de la simulación anterior (figura 4.38). El objetivo de este análisis es escoger el valor de resistencia de desmagnetización que habría que poner en la topología con red de desmagnetización RD para que los resultados sean comparables.

Comparando las gráficas y los tiempos de la figura 4.38 y la figura 4.39 puede concluirse que los tiempos de desmagnetización del solenoide en el circuito analizado utilizando poniendo resistencias superiores a 40 Ω son menores que en el resto de implementaciones analizadas: 0,17 ms frente a 0,24 ms del convertidor elevador y 0,28 ms del convertidor directo con doble interruptor.



$$t_{\text{desmagnetización}} = 0,24 \text{ ms}$$

$$t_{\text{desmagnetización}} = 0,28 \text{ ms}$$

a. Corriente por el solenoide en el convertidor elevador ($R_{\text{carga}} = 1 \text{ K}\Omega$, $C_O = 22 \text{ }\mu\text{F}$)

b. Corriente por el solenoide en el convertidor con doble interruptor

Figura 4.39. Corriente por el solenoide y tiempos de desmagnetización de las topologías: convertidor elevador y convertidor directo con doble interruptor

Tras el efecto observado al modificar la resistencia de desmagnetización en la topología con red de desmagnetización RD, se ha procedido a realizar las simulaciones donde se dispara cada solenoide con una secuencia de siete disparos. En la figura 4.40 y la figura 4.41 se han recogido las formas de onda más significativas de dos de las simulaciones realizadas: Tensión de disparo en los solenoides, corriente por uno de ellos, tensión en el diodo y tensión en el interruptor principal.

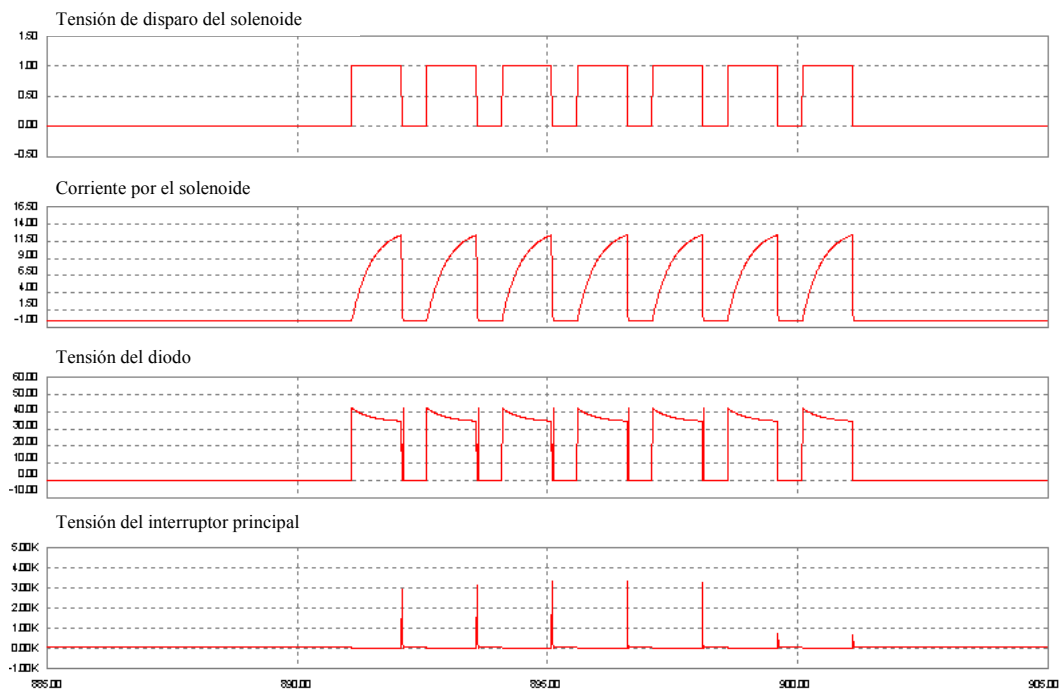


Figura 4.40. Formas de onda más significativas de la topología con red de desmagnetización RD obtenidas con una resistencia de desmagnetización de $500 \text{ }\Omega$: tiempo de desmagnetización de cada solenoide $20 \text{ }\mu\text{s}$, tensión máxima en el diodo $41,8 \text{ V}$, tensión máxima en el interruptor 3180 V y potencia de entrada 940 W

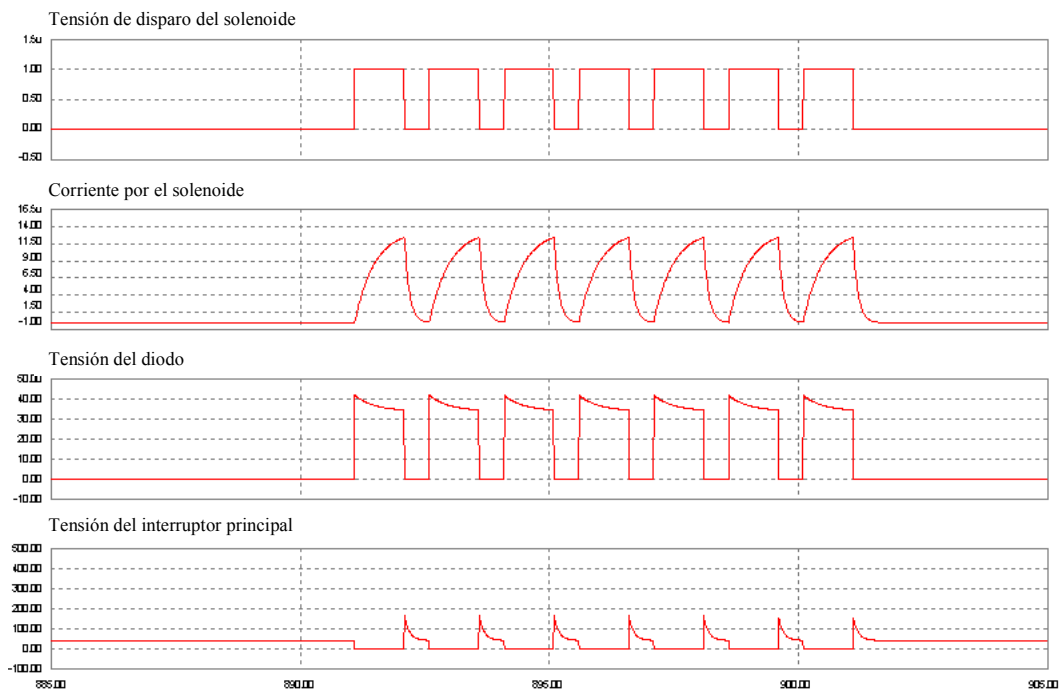


Figura 4.41. Formas de onda más significativas de la topología con red de desmagnetización RD obtenidas con una resistencia de desmagnetización de $10\ \Omega$: tiempo de desmagnetización de cada solenoide 0,5 ms, tensión máxima en el diodo 41,9 V, tensión máxima en el interruptor 165 V y potencia de entrada 966 W

Aunque con mayor resistencia se consiguen menores tiempos de desmagnetización, la tensión en los semiconductores también aumenta con la resistencia.

Todos los resultados del análisis de sensibilidad a la resistencia de desmagnetización de la topología con red de desmagnetización RD se han recogido en la *tabla 4.4*.

Tabla 4.4. Valores más significativos del análisis de sensibilidad de la topología con red de desmagnetización RD

Resistencia de desmagnetización (Ω)	Tensión inversa máxima en el diodo (V)	Tensión máxima en el interruptor principal (V)	Tiempo de desmagnetización (ms)	Potencia total consumida en el circuito (W)	Potencia disipada por la resistencia de desmagnetización (W)
500	41,8	3340	0,03	940	2,97
40	41,8	524	0,15	950	2,8
30	41,9	405	0,19	950	2,7
25	41,9	346	0,22	950	2,64
20	41,9	287	0,27	950	2,56
15	41,9	226	0,35	960	2,43
12	41,9	189	0,42	960	2,33
10	41,9	165	0,5	966	1,8

De la *tabla 4.4* se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para un valor de resistencia de desmagnetización de 500 Ω el tiempo de desmagnetización es muy pequeño (0,03 ms), pero la tensión de pico en el transistor llega a ser de 3340 V y esta solución es por tanto inaceptable. Sin embargo, para resistencias de 20 Ω esta tensión es menor que 350 V, aunque el tiempo de desmagnetización (0,27 ms) es comparable al de las otras soluciones topológicas propuestas (0,24 ms del convertidor elevador en la *figura 4.39a* y 0,28 ms del convertidor directo con doble interruptor en la *figura 4.39b*).
- La potencia cedida por la fuente de entrada no es excesivamente sensible al valor de la resistencia, puesto que varía entre 966 W para el peor caso analizado (10 Ω) y 940 W para el mejor (500 Ω).
- La resistencia de desmagnetización disipa muy poca potencia, estando estas pérdidas comprendidas entre 2 W y 4 W, dependiendo del valor de la resistencia.

4.8.3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Tras el análisis a través de la simulación de la topología con red de desmagnetización, se pueden apreciar los resultados experimentales en las figuras que

se muestran a continuación. La *figura 4.42* muestra las formas de onda obtenidas con el circuito original, es decir, con un diodo en antiparalelo con el solenoide pero sin resistencia de desmagnetización. En estas condiciones no se consigue un tiempo de desmagnetización suficiente y el solenoide no llega a desmagnetizarse. Donde mejor se observa este efecto es en la corriente por el diodo, que debería dejar de conducir antes de producirse el siguiente pulso.

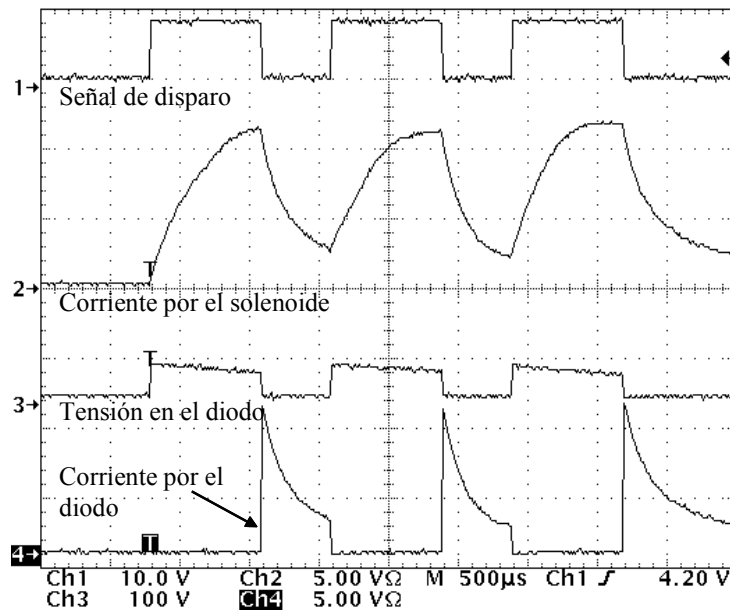


Figura 4.42. Formas de onda experimentales más representativas de la topología original obtenidas mediante la plataforma de ensayos

En la *figura 4.43*, ya con una resistencia de desmagnetización de 22Ω , se puede apreciar cómo se reducen los tiempos de desmagnetización, permitiendo el disparo secuencial de los solenoides. En la *figura 4.44* se muestran las mismas formas de onda en las que se puede apreciar cómo un aumento de la resistencia de desmagnetización incrementa visiblemente la velocidad de desmagnetización. El efecto de aumentar la resistencia de desmagnetización es apreciable sobre todo en la corriente por el diodo, que reduce de forma considerable su tiempo de conducción.

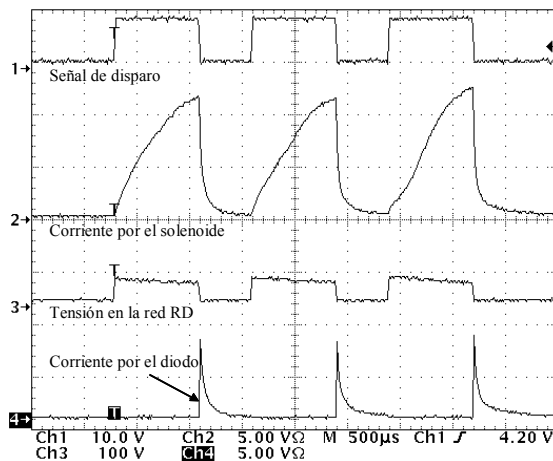


Figura 4.43. Formas de onda experimentales más representativas de la topología con red de desmagnetización RD ($R_{desmag.}=22\ \Omega$) obtenidas mediante la plataforma de ensayos

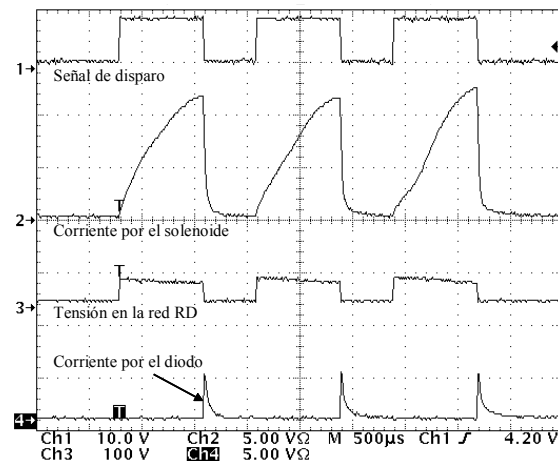


Figura 4.44. Formas de onda experimentales más representativas de la topología con red de desmagnetización RD ($R_{desmag.}=47\ \Omega$) obtenidas mediante la plataforma de ensayos

4.8.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA TOPOLOGÍA CON RED DE DESMAGNETIZACIÓN RD

Las principales conclusiones extraídas del análisis de la topología con red de desmagnetización RD son las siguientes:

- El tiempo de desmagnetización conseguido con esta solución es comparable al de las otras alternativas propuestas.
- Se trata de un circuito simple y robusto, muy similar al que ya está implementado. Simplemente introduce la reducción del tiempo de desmagnetización gracias a la inclusión de la resistencia de desmagnetización.
- Las resistencias que disipan la energía almacenada en el solenoide se encuentran repartidas en toda la placa y no suponen más de 3 W por cada una de ellas.
- Dependiendo del valor de la resistencia de desmagnetización varía la tensión máxima aplicada al interruptor principal. Existe un valor de resistencia para el cual se pueden conseguir tensiones máximas aceptables. Por ejemplo, con $22\ \Omega$ se logran tensiones menores de 350 V y tiempos de desmagnetización suficientemente buenos (en torno a 0,25 ms).



4.9. COMPARATIVA ENTRE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

Después de haber llevado a cabo un análisis exhaustivo basado en simulaciones de las cuatro posibles soluciones para accionar los solenoides de la impresora Braille tipo impacto, se resumen las características de todas ellas en el siguiente cuadro descriptivo (*tabla 4.5*):

Tabla 4.5. Cuadro resumen de las cuatro topologías analizadas

Alternativa	Tiempo desmagnetización	R. baja tensión	Recirculación de la energía	Temperatura	Elementos del circuito (coste y complejidad)	Fiabilidad	Solicitaciones eléctricas
Elevador	Similares	Cumplen	No	Un solo foco de calor concentrado (300W)	Un condensador y una resistencia más que en el circuito original	Alta	Alta
Elevador con reutilización de la energía			Sí	Pérdidas concentradas en convertidor reductor	Lo mismo que el anterior más todos los elementos del circuito reductor (etapa de potencia + control)	Media	Alta
Convertidor directo			Sí	Sin focos de calor	Un diodo, un interruptor y un driver aislado por cada uno de los solenoides	Baja	Baja
Red de desmagnetización RD			No	Un foco de calor (<3W) adicional por cada solenoide. Foco distribuido	Una resistencia por cada solenoide	Alta	Alta

En este cuadro se resumen las siguientes características del estudio realizado de los distintos accionadores de solenoides utilizados en impresoras Braille de tipo impacto:



- Se han analizado cuatro tipos de accionadores eléctricos para solenoides utilizados en impresoras Braille de tipo impacto. Dos de ellas son disipativas y las otras dos reutilizan la energía asociada a la desmagnetización del solenoide.
- Las cuatro alternativas disminuyen el tiempo de desmagnetización del solenoide respecto a la topología original empleada para el accionamiento de los solenoides de las impresoras Braille. Estos tiempos de desmagnetización están por debajo de los 0,5 ms en todas ellas, mientras que en la topología original están aproximadamente en 4 ms.
- Todas las topologías cumplen con el reglamento de baja tensión, por el cual no se superan tensiones medias de 75 V en ningún caso.
- El convertidor directo con doble interruptor es la mejor alternativa desde el punto de vista del calentamiento, ya que es la única topología que no supone focos de calor en la placa. El elevador tiene un foco de calor concentrado en la resistencia de carga propia del diseño. Por otra parte, el elevador con reutilización de energía centra el calor en el interruptor en la etapa reductora. Finalmente, la topología con red de desmagnetización RD distribuye el calor por la placa a costa de emplear una resistencia por cada solenoide.
- El coste y la complejidad de cada alternativa vienen dados en gran parte por la cantidad de componentes empleados, así como de su naturaleza. Además, la complejidad del control es otro factor importante en este aspecto. Desde este punto de vista, la solución más sencilla es la topología con red de desmagnetización RD por el reducido número de componente que supone con respecto a la topología original empleada para el accionamiento de los solenoides. La topología elevadora parece una buena alternativa, ya que solo supone un condensador y una resistencia más que la topología original. Sin embargo, implica el rutado de circuitería adicional para reconducir las corrientes al par condensador-resistencia de salida. En este aspecto, las soluciones no disipativas (elevador con reutilización de energía y convertidor directo con doble interruptor) son las más desfavorables, ya que además de utilizar más componentes, el sistema de control es más complejo.



- La fiabilidad de cada solución viene dada por la cantidad de componentes que la componen así como por su naturaleza. También influye la dificultad de control de cada alternativa. Teniendo en cuenta estas consideraciones, las alternativas que ofrecen una mayor fiabilidad son la topología elevadora y la topología con red de desmagnetización RD. Por el contrario, el convertidor directo con doble interruptor se convierte en la menos fiable de las propuestas debido a la complejidad que supone su control.
- A pesar de ser la solución menos fiable, el convertidor directo con doble interruptor es la alternativa que supone menores tensiones máximas en los semiconductores. Estas tensiones máximas están por debajo de los 50 V, mientras que en el resto de topologías son necesarios picos de tensión más elevados en alguno de sus componentes para conseguir velocidades de desmagnetización superiores.

Según este cuadro resumen, la solución que presenta una mejor relación de compromiso entre la fiabilidad, el coste, las solicitaciones eléctricas de los componentes y la velocidad de desmagnetización es la última analizada (red de desmagnetización RD). Este circuito además presenta la importante ventaja de ser muy similar al utilizado por las impresoras Braille de tipo impacto originariamente, de modo que habría que incluir muy pocas variaciones en el diseño convencional de la placa.

Por otra parte, la opción del convertidor directo con doble interruptor se puede considerar una solución interesante en impresoras con pocos solenoides, siempre y cuando se valore antes la complejidad del accionador de los interruptores.



CAPÍTULO 5

ESTUDIO ECONÓMICO



En el presente capítulo se aborda la estimación de los costes derivados de la realización del proyecto. Los costes totales del proyecto comprenden por una parte los costes de desarrollo de ingeniería y documentación; y por otra parte se estima un 10 % más de los costes totales para otros gastos.

5.1. COSTES DE DESARROLLO

Los costes de desarrollo engloban el análisis, diseño y documentación de las topologías estudiadas así como el diseño y montaje del banco de ensayos. Para ello se estima un coste de 50 €/h en conceptos de trabajo de ingeniería y de 20 €/h en conceptos de documentación. En otros gastos se incluyen la compra del material empleado para la realización de las pruebas experimentales así como la amortización de las licencias necesarias para los programas utilizados.

ACTIVIDAD	€/hora	nº horas	COSTE
Desarrollo de Ingeniería	50	550	27500 €
Análisis y diseño de las topologías propuestas	50	450	22500 €
Diseño y montaje de la plataforma de ensayos	50	100	5000 €
Documentación	20	60	1200 €
Otros gastos (10%)			2870 €
Total			31570 €

5.2 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Una vez evaluados los costes totales del proyecto, el presupuesto total del proyecto es el siguiente:

TIPO DE COSTE	COSTE
Coste de desarrollo	31570 €
I.V.A. (16%)	5051,2 €
Total	36621,2 €



El coste total del proyecto asciende a treinta y seis mil seiscientos veintiún euros y dos céntimos, con I.V.A. incluido.



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



En este proyecto se ha abordado la mejora del funcionamiento de las impresoras Braille de tipo impacto.

En primer lugar se ha analizado y comparado el comportamiento de dos tipos de solenoide (tipo A y tipo B) empleados en impresoras Braille comerciales con distintas condiciones de funcionamiento. De este análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la calidad del punto, el *solenoide tipo B* imprime puntos más esféricos que el *solenoide tipo A*. Además, ni la tensión de entrada empleada ni la técnica de disparo influyen significativamente en este aspecto.
- El *solenoide tipo A* requiere mayor energía que el *solenoide tipo B* para imprimir puntos con la misma calidad. En consecuencia, los tiempos y las corrientes máximas que se alcanzan son superiores en la mayoría de los casos con el *solenoide tipo A* que con el *solenoide tipo B*. Debido a la menor pendiente de subida en la corriente que atraviesa el *solenoide tipo B*, se penaliza el tiempo empleado para la magnetización del mismo.
- Del análisis cualitativo realizado acerca del ruido de impresión producido por cada tipo de solenoide, no se han apreciado diferencias significativas entre uno y otro. No obstante, se ha observado que el *solenoide tipo A* produce un ruido doble durante el impacto. Además, tensiones de alimentación menores reducen sensiblemente los niveles de ruido, mientras que la técnica de disparo empleada no causa ningún efecto sobre este parámetro.
- Los niveles de temperatura alcanzados durante el funcionamiento de ambos solenoides son mayores para el *solenoide tipo A*, que a su vez es más sensible a las modificaciones de la tensión de alimentación. Es decir, desde el punto de vista del calentamiento el *solenoide tipo B* no solo se calienta menos, sino que un incremento de la tensión de entrada le influye menos que al *solenoide tipo A*. Por otra parte, la técnica de disparo no afecta notablemente a las variaciones de temperatura producidas en el solenoide.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todos los parámetros considerados para la caracterización del solenoide, se determinó que la opción más ventajosa para su uso en

impresoras Braille de tipo impacto sería la de utilizar el **solenoides tipo B gobernado por una señal de pulso único y alimentado con 42 V**. El control por pulso único se debe a que no se ha logrado el efecto deseado de las técnicas de disparo consistentes en multipulso, con las que se pretendía controlar el movimiento mecánico del solenoide. La tensión de alimentación escogida es una tensión elevada para favorecer el incremento de las velocidades de impresión, y que además cumple con la normativa 60950N, que impide que se utilicen tensiones de alimentación por encima de los 50 V.

Con las condiciones de funcionamiento seleccionadas, se han analizado en segundo lugar cuatro posibles topologías para el accionamiento de los solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto. De este estudio cabe destacar las siguientes conclusiones:

- Todas las alternativas analizadas suponen una reducción notable del tiempo de desmagnetización del solenoide respecto a la topología original (de aproximadamente 4 ms a tiempos inferiores a 2 ms). Es decir, las cuatro topologías logran un **aumento de la velocidad de impresión**.
- La **topología elevadora con reutilización de energía queda descartada como alternativa para el accionamiento de los solenoides** porque no cumple con los objetivos para los que se propuso. Aunque es capaz de recircular la energía que se disiparía en la resistencia de carga de la topología elevadora, esta energía no se devuelve en el instante en el que es requerida, que es durante el proceso de magnetización de los solenoides. Además, en ningún caso se transfiere la suficiente energía como para ayudar a reducir el condensador de entrada, que es uno de los objetivos por los que se planteó esta topología.
- Teniendo en cuenta los **focos de calor** existentes en cada alternativa, la mejor solución es el convertidor directo con doble interruptor, por ser la única alternativa que no supone disipación de energía. La segunda opción más interesante desde este punto de vista es la topología con red de desmagnetización RD, ya que los focos de calor estarían distribuidos por toda la placa (una resistencia por cada solenoide). Por el contrario, la topología elevadora supondría un único foco de calor y la inminente necesidad de añadir elementos disipadores.



- En cuanto a las máximas **solicitaciones eléctricas** existentes en cada topología, la el convertidor directo con doble interruptor se propone como la solución más ventajosa. En esta alternativa la tensión máxima que han de soportar tanto los transistores como los diodos de desmagnetización, es la tensión de entrada. En cambio, en el resto de alternativas, el proceso de desmagnetización implica elevados picos de tensión en alguno de sus componentes en comparación con el convertidor directo con doble interruptor.
- Desde el punto de vista de la **complejidad de cada solución**, la topología con red de desmagnetización RD se plantea como la más sencilla, ya que solo supone una resistencia más que la topología original. La segunda mejor opción sería la topología elevadora, que únicamente implica la adición de dos elementos pasivos (una resistencia y un condensador) con respecto a la topología original. En este aspecto, el convertidor directo con doble interruptor tiene una desventaja importante, ya que el disparo del transistor superior hace que el control sea complicado, reduciendo su fiabilidad. Además, la adición de un *driver*, un diodo y un transistor por cada solenoide encarece esta alternativa.

Según este análisis, se propone como alternativa más interesante para el accionamiento de los solenoides utilizados en impresoras Braille de tipo impacto la **topología con red de desmagnetización RD** por su sencillez y fiabilidad. No obstante, se plantea como una solución factible para impresoras personales el **convertidor directo con doble interruptor**, donde el número de componentes es inferior. El empleo de esta topología supone la adición de un *driver* por cada solenoide que sea capaz de aislar el disparo del transistor superior de la masa del circuito. Los motivos por los cuales se propone como solución para impresoras con pocos solenoides son principalmente la complejidad que implica su control y el coste que puede suponer el *driver*.

Como ventaja adicional a la velocidad de impresión y la reducción del calentamiento de los solenoides, se desprende de este análisis la posibilidad de realizar el **disparo secuenciado** de los solenoides, lo que supondría:

1. Una disminución de los niveles de ruido producido por el impacto de los solenoides.



2. La reducción de la batería de condensadores de entrada empleada para satisfacer las necesidades de los solenoides, ya que al disparar secuencialmente las sollicitaciones eléctricas de los mismos son inferiores.

A continuación se proponen una serie de mejoras y trabajos futuros surgidos a raíz del análisis realizado, que supondrían un avance en este campo de aplicación.

- En primer lugar, se deberían implementar las alternativas propuestas como posibles soluciones en una impresora comercial, de manera que se corroboren los resultados obtenidos.
- Otra mejora importante sería un modelado preciso del solenoide, que permita relacionar los parámetros eléctricos con los mecánicos para un diseño más adecuado del accionador del solenoide.
- A fin de conseguir un análisis más profundo de las topologías presentadas como solución para los accionadores de solenoides de las impresoras Braille de tipo impacto, queda pendiente realizar el diseño de la fuente de alimentación empleada en las impresoras Braille. La caracterización de dicha fuente basaría su desarrollo en dos estudios relacionados con el comportamiento dinámico de la misma:
 - Regulación de carga: Analizar cómo afecta a la propia fuente el accionamiento del solenoide.
 - Análisis de la máxima caída de tensión admisible en la fuente ante las sollicitaciones eléctricas del accionador.
- Para la alternativa del convertidor directo con doble interruptor, resultaría interesante un estudio exhaustivo del *driver* de los interruptores principales. El coste y la fiabilidad serían las características principales a tener en cuenta en dicho análisis, ya que son fundamentales para dar validez a esta alternativa. Por ello, es importante que se trate de un circuito accionador con pocos componentes y de naturaleza pasiva a ser posible.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS



Electrónica de Potencia

Daniel W. Hart, “Electrónica de Potencia”, Ed. Prentice Hall, 2001.

Lenguaje VHDL

Douglas J. Smith, “HDL Chip design”, Ed. Doone Publications, 1996.

Referencias

- [1]:http://www.discapnet.com/Discapnet/Castellano/Accesibilidad/Calidad/Ayudas+tecnicas/Guias+tecnicas/GuiasTecnicas_002.htm
- [2]:http://www.mipunto.com/temas/1er_trimestre05/alfabetobrilie.html
- [3]:<http://es.wikipedia.org/wiki/Braille/>
- [4]:<http://cidat.once.es/>

Documentos web

<http://www.opencores.com/>

<http://www.xilinx.com/>



ANEXOS



ANEXO 1

CÓDIGO VHDL PARA EL CONTROL DE LOS SOLENOIDES



```
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA PULSO ÚNICO-----  
-----  
--  
-- Paquete de constantes  
--  
-- Fichero: CounterPack.vhd  
--  
-- Descripción: Constantes para el generador de pulsos del circuito de control de la técnica  
--             de pulso único.  
-----
```

```
library WORK, IEEE;  
use IEEE.std_logic_1164.all;  
use IEEE.std_logic_arith.all;  
  
package CounterPack is  
  
-- Constantes  
constant NSecuencia : integer := 100000; -- N° de veces que se repite la secuencia  
constant TSecuencia : integer := 1650000; -- N° de ciclos de reloj que dura el periodo de la secuencia  
constant TPulso : integer := 40000;      -- N° de ciclos de reloj que dura el periodo del pulso  
  
constant cycle : time := 20 ns;          -- Período del reloj de la FPGA (solo para la simulación)  
  
end CounterPack;
```

```
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA PULSO ÚNICO-----  
-----  
--  
-- Generador de pulsos  
--  
-- Fichero: PulseGen.vhd  
--  
-- Descripción: Bloque que genera el pulso de disparo.  
-----
```

```
library WORK, IEEE;  
use IEEE.std_logic_1164.all;  
use WORK.CounterPack.all;  
  
entity PulseGen is  
    port (    clk    : in std_logic;    -- Reloj del sistema  
            Reset : in std_logic;      -- Señal de reseteo  
            Fin    : out std_logic;     -- Indicador de fin de secuencia total  
            Pulse  : out std_logic;     -- Pulso generado  
    );  
  
end;  
  
architecture sintetizable of PulseGen is  
    signal count_TSecuencia : integer range 0 to TSecuencia-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de una  
                                                                -- secuencia  
    signal count_NSecuencia : integer range 0 to NSecuencia-1; -- Cuenta las veces que se repite la secuencia  
  
begin  
  
    contador_NSecuencia: process (Reset,clk)
```



```
begin
  if Reset='1' then
    count_TSecuencia <= 0;
    count_NSecuencia <= 0;
  elsif clk='1' and clk'event then
    if count_NSecuencia < NSecuencia-1 then
      if count_TSecuencia < TSecuencia-1 then
        count_TSecuencia <= count_TSecuencia+1;
      else
        count_TSecuencia <= 0;
        count_NSecuencia <= count_NSecuencia+1;
      end if;
    else
      count_NSecuencia <= NSecuencia-1;
      count_TSecuencia <= TSecuencia-1;
    end if;
  end if;
end process contador_NSecuencia;

Pulse <='1' when count_TSecuencia<TPulso else '0';
Fin   <='1' when count_NSecuencia=NSecuencia-1 else '0';

end sintetizable;
```

```
-----
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA PULSO ÚNICO-----
-----
--
-- Banco de pruebas
--
-- Fichero: PulseGen_tb.vhd
--
-- Descripción: Testbench para el modelo del generador de pulsos del circuito de control.
--              Técnica de pulso único.
-----
```

```
library WORK, IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use WORK.CounterPack.all;

entity testbench is
end testbench;

architecture TestBench of testbench is

  component PulseGen
  port( Reset   : in std_logic;
        clk     : in std_logic;
        Pulse   : out std_logic;
        Fin     : out std_logic
      );
  end component;

  signal clk_tb   : std_logic;
  signal Res_tb   : std_logic;
  signal Fin_tb   : std_logic;
  signal Pulse_tb : std_logic;
```



```
begin

The_pulse_generator : PulseGen
port map (
  clk    => clk_tb,
  Reset  => Res_tb,
  Fin    => Fin_tb,
  Pulse  => Pulse_tb
);

Clockgenerator : process
begin
  clk_tb <='1';
  wait for 2*Cycle;
  clk_tb <='0';
  wait for 2*Cycle;
end process Clockgenerator;

Principal : process
begin
  Res_tb <='1';
  wait for 160*Cycle;
  Res_tb <='0';
  wait until Fin_tb = '1';
  assert false
    report "End of simulation"
    severity failure;
end process Principal;

end testbench;
```

```
-----
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 1 Y 2-----
-----
--
-- Paquete de constantes
--
-- Fichero: CounterPack.vhd
--
-- Descripción: Constantes para el generador de pulsos del circuito de control de las técnicas
--              multipulso 1 y 2.
-----
```

```
library WORK, IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.std_logic_arith.all;

package CounterPack is

-- Constantes
constant NSecuencia : integer := 3000;      -- N° de veces que se repite la secuencia
constant TSecuencia : integer := 10000000;  -- N° de ciclos de reloj que dura el periodo de la secuencia
constant Np1 : integer := 1;                -- N° de pulsos del primer tren de pulsos
constant Tp1 : integer := 13001;            -- N° de ciclos de reloj correspondientes al periodo del primer tren
constant p1 : integer := 12500;             -- N° de ciclos de reloj que dura cada pulso(ton)del primer tren
constant Np2 : integer := 19;              -- N° de pulsos del segundo tren de pulsos
```




```
constant Tp2 : integer := 1816 ;      -- N° de ciclos de reloj correspondientes al periodo de los pulsos del segundo
                                       -- tren
constant p2 : integer := 1315;      -- N° de ciclos de reloj que dura cada pulso( $t_{on}$ )del segundo tren
constant Np3 : integer := 3;        -- N° de pulsos del tercer tren
constant Tp3 : integer := 21917;    -- N° de ciclos de reloj correspondientes al periodo de los pulsos del tercer tren
constant p3 : integer := 18667;    -- N° de ciclos de reloj que dura cada pulso( $t_{on}$ )del tercer tren
constant cycle : time := 20 ns;     -- Período del reloj de la FPGA (solo para la simulación)

end CounterPack;
```

```
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 1 Y 2-----
--
-- Generador de pulsos
--
-- Fichero: PulseGen.vhd
--
-- Descripción: Bloque que genera los pulsos.
--             Primero genera un pulso largo. A continuación un tren de pulsos.
--             Finalmente uno o tres pulsos largos dependiendo de si es técnica
--             de multipulsos 1 o 2.
-----

library WORK, IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use WORK.CounterPack.all;

entity PulseGen is
    port ( clk : in std_logic; -- Reloj del sistema
          Reset : in std_logic; -- Señal de reseteo
          Fin : out std_logic; -- Indicador de fin de secuencia total
          Pulse : out std_logic -- Tren de pulsos generado
        );
end;

architecture sintetizable of PulseGen is
    type estados is (activacion,acercamiento,impacto,espera);
    -- Definicion de los estados:
    -- Estado activación : Primer tren de pulsos
    -- Estado acercamiento : Segundo tren de pulsos
    -- Estado impacto : Tercer tren de pulsos
    -- Estado espera : Espera para recomenzar con el primer tren de pulsos
    signal estado : estados;
    signal count_NSecuencia : integer range 0 to NSecuencia; -- Cuenta las veces que se repite la secuencia
    signal count_TSecuencia : integer range 0 to TSecuencia-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de una
                                                                -- secuencia
    signal count_Np1 : integer range 0 to Np1-1; -- Cuenta los pulsos del primer tren
    signal count_Tp1 : integer range 0 to Tp1-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos
                                                                -- del primer tren
    signal count_Np2 : integer range 0 to Np2-1; -- Cuenta los pulsos del segundo tren
    signal count_Tp2 : integer range 0 to Tp2-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos
                                                                -- del segundo tren
    signal count_Np3 : integer range 0 to Np3-1; -- Cuenta los pulsos del tercer tren
    signal count_Tp3 : integer range 0 to Tp3-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos
                                                                -- del tercer tren
    signal Pulse1 : std_logic;
```



```
signal Pulse2      : std_logic;
signal Pulse3      : std_logic;

begin

control_estados: process (clk,Reset)

begin
  if Reset='1' then
    estado <= activacion;
  elsif clk='1' and clk'event then
    case estado is
      when activacion =>
        if count_Np1 < Np1-1 then
          estado <= activacion;
        elsif count_Np1 = Np1-1 and count_Tp1 = Tp1-1 then
          estado <= acercamiento;
        end if;
        when acercamiento =>
          if count_Np2 < Np2-1 then
            estado <= acercamiento;
          elsif count_Np2 = Np2-1 and count_Tp2 = Tp2-1 then
            estado <= impacto;
          end if;
          when impacto =>
            if count_Np3 < Np3-1 then
              estado <= impacto;
            elsif count_Np3 = Np3-1 and count_Tp3 = Tp3-1 then
              estado <= espera;
            end if;
            when espera =>
              if count_TSecuencia < TSecuencia-1 then
                estado <= espera;
              elsif count_TSecuencia = TSecuencia-1 and count_NSecuencia < NSecuencia-1 then
                estado <= activacion;
              end if;
            when others =>
              end case;
          end if;
        end process control_estados;

contador_NSecuencia: process (Reset,clk)

begin
  if Reset='1' then
    count_TSecuencia <= 0;
    count_NSecuencia <= 0;
  elsif clk='1' and clk'event then
    if count_NSecuencia < NSecuencia then
      if count_TSecuencia < TSecuencia-1 then
        count_TSecuencia <= count_TSecuencia+1;
      else
        count_TSecuencia <= 0;
        count_NSecuencia <= count_NSecuencia+1;
      end if;
    else
      count_NSecuencia <= NSecuencia;
      count_TSecuencia <= TSecuencia-1;
```



```
end if;  
end if;  
end process contador_NSecuencia;
```

```
contador_P1: process (Reset,clk)
```

```
begin  
  if Reset='1' then  
    count_Tp1 <= 0;  
    count_Np1 <= 0;  
  elsif clk='1' and clk'event then  
    case estado is  
      when activacion =>  
        if count_Np1 < Np1-1 then  
          if count_Tp1 < Tp1-1 then  
            count_Tp1 <= count_Tp1+1;  
          else  
            count_Tp1 <= 0;  
            count_Np1 <= count_Np1+1;  
          end if;  
        elsif count_Np1 = Np1-1 then  
          if count_Tp1 < Tp1-1 then  
            count_Tp1 <= count_Tp1+1;  
          end if;  
        end if;  
      when others =>  
        count_Tp1 <= 0;  
        count_Np1 <= 0;  
      end case;  
    end if;  
  end process contador_P1;
```

```
contador_P2: process (Reset,clk)
```

```
begin  
  if Reset='1' then  
    count_Tp2 <= 0;  
    count_Np2 <= 0;  
  elsif clk='1' and clk'event then  
    case estado is  
      when acercamiento =>  
        if count_Np2 < Np2-1 then  
          if count_Tp2 < Tp2-1 then  
            count_Tp2 <= count_Tp2+1;  
          else  
            count_Tp2 <= 0;  
            count_Np2 <= count_Np2+1;  
          end if;  
        elsif count_Np2 = Np2-1 then  
          if count_Tp2 < Tp2-1 then  
            count_Tp2 <= count_Tp2+1;  
          end if;  
        end if;  
      when others =>  
        count_Tp2 <= 0;  
        count_Np2 <= 0;  
      end case;  
    end if;  
  end process contador_P2;
```



```
end if;
end process contador_P2;

contador_P3: process (Reset,clk)

begin
  if Reset='1' then
    count_Tp3 <= 0;
    count_Np3 <= 0;
  elsif clk='1' and clk'event then
    case estado is
      when impacto =>
        if count_Np3 < Np3-1 then
          if count_Tp3 < Tp3-1 then
            count_Tp3 <= count_Tp3+1;
          else
            count_Tp3 <= 0;
            count_Np3 <= count_Np3+1;
          end if;
        elsif count_Np3 = Np3-1 then
          if count_Tp3 < Tp3-1 then
            count_Tp3 <= count_Tp3+1;
          end if;
        end if;
      when others =>
        count_Tp3 <= 0;
        count_Np3 <= 0;
      end case;
    end if;
  end process contador_P3;

  Pulse1 <='1' when count_Tp1<p1 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=activacion else '0';
  Pulse2 <='1' when count_Tp2<p2 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=acercamiento else '0';
  Pulse3 <='1' when count_Tp3<p3 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=impacto else '0';

  Pulse <= Pulse1 or Pulse2 or Pulse3;
  Fin <='1' when count_NSecuencia=NSecuencia else '0';

end sintetizable;
```

```
-----
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 1 Y 2-----
-----
--
-- Banco de pruebas
--
-- Fichero: PulseGen_tb.vhd
--
-- Descripción: Testbench para el modelo del generador de pulsos del circuito de control.
--              Técnicas multipulso 1 y 2.
-----
```

```
library WORK, IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use WORK.CounterPack.all;

entity testbench is
end testbench;
```



architecture TestBench of testbench is

```
component PulseGen
port( Reset   : in  std_logic;
      clk     : in  std_logic;
      Pulse   : out std_logic;
      Fin     : out std_logic
);
end component;

signal clk_tb   : std_logic;
signal Res_tb  : std_logic;
signal Fin_tb   : std_logic;
signal Pulse_tb : std_logic;

begin

The_pulse_generator : PulseGen
port map (
  clk   => clk_tb,
  Reset => Res_tb,
  Fin   => Fin_tb,
  Pulse => Pulse_tb
);

Clockgenerator : process
begin
  clk_tb <='1';
  wait for 0.5*Cycle;
  clk_tb <='0';
  wait for 0.5*Cycle;
end process Clockgenerator;

Principal : process
begin
  Res_tb <='1';
  wait for 160*Cycle;
  Res_tb <='0';
  wait until Fin_tb='1';
  assert false
    report "End of simulation"
    severity failure;
end process Principal;

end testbench;
```



-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 3-----

--
-- Paquete de constantes
--
-- Fichero: CounterPack.vhd
--
-- Descripción: Constantes para el generador de pulsos del circuito de control de la técnica
-- de multipulsos 3.

```
library WORK, IEEE;  
use IEEE.std_logic_1164.all;  
use IEEE.std_logic_arith.all;
```

```
package CounterPack is
```

```
-- Constantes  
constant NSecuencia : integer := 500;      -- Nº de veces que se repite la secuencia  
constant TSecuencia : integer := 10000000; -- Nº de ciclos de reloj que dura el periodo de la secuencia  
constant Np1 : integer := 1;               -- Nº de pulsos del primer tren de pulsos  
constant Tp1 : integer := 22874;           -- Nº de ciclos de reloj correspondientes al periodo del primer tren  
constant p1 : integer := 22500;            -- Nº de ciclos de reloj que dura cada pulso(ton)del primer tren  
constant Np2 : integer := 35;              -- Nº de pulsos del segundo tren de pulsos  
constant Tp2 : integer := 1489;            -- Nº de ciclos de reloj correspondientes al periodo de los pulsos del segundo  
-- tren  
constant p2 : integer := 1115;             -- Nº de ciclos de reloj que dura cada pulso(ton)del segundo tren  
constant Np3 : integer := 1;              -- Nº de pulsos del tercer tren de pulsos  
constant Tp3 : integer := 22503;           -- Nº de ciclos de reloj correspondientes al periodo de los pulsos del tercer tren  
constant p3 : integer := 22500;            -- Nº de ciclos de reloj que dura cada pulso(ton)del tercer tren  
constant Np4 : integer := 33;             -- Nº de pulsos del cuarto tren de pulsos  
constant Tp4 : integer := 303;            -- Nº de ciclos de reloj correspondientes al periodo de los pulsos del cuarto tren  
constant p4 : integer := 300;             -- Nº de ciclos de reloj que dura cada pulso(ton)del cuarto tren  
  
constant cycle : time := 20ns;            -- Período del reloj de la FPGA (solo para simulación)
```

```
end CounterPack;
```

-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 3-----

--
-- Generador de pulsos
--
-- Fichero: PulseGen.vhd
--
-- Descripción: Bloque que genera los pulsos
-- Primero genera un pulso largo, a continuación un tren de pulsos cortos.
-- Después otro pulso largo y finalmente un tren de pulsos cortos.

```
library WORK, IEEE;  
use IEEE.std_logic_1164.all;  
use WORK.CounterPack.all;
```



```
entity PulseGen is
    port (    Fin    : out std_logic;
            Pulse   : out std_logic;
            clk     : in  std_logic;
            Reset   : in  std_logic);
end;

architecture sintetizable of PulseGen is
    type estados is (activacion,acercamiento,pulso_aux,impacto,espera);
    -- Definicion de los estados:
    -- Estado activación    : Primer tren de pulsos
    -- Estado acercamiento : Segundo tren de pulsos
    -- Estado pulso_aux    : Tercer tren de pulsos
    -- Estado impacto      : Cuarto tren de pulsos
    -- Estado espera       : Espera para recomenzar con el primer tren de pulsos
    signal estado : estados;
    signal count_NSecuencia : integer range 0 to NSecuencia; -- Cuenta las veces que se repite la secuencia
    signal count_TSecuencia : integer range 0 to TSecuencia-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de una
    -- secuencia
    signal count_Np1 : integer range 0 to Np1-1; -- Cuenta los pulsos del primer tren
    signal count_Tp1 : integer range 0 to Tp1-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos del
    -- primer tren
    signal count_Np2 : integer range 0 to Np2-1; -- Cuenta los pulsos del segundo tren
    signal count_Tp2 : integer range 0 to Tp2-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos del
    -- segundo tren
    signal count_Np3 : integer range 0 to Np3-1; -- Cuenta los pulsos del tercer tren
    signal count_Tp3 : integer range 0 to Tp3-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos del
    -- tercer tren
    signal count_Np4 : integer range 0 to Np4-1; -- Cuenta los pulsos del cuarto tren
    signal count_Tp4 : integer range 0 to Tp4-1; -- Cuenta los ciclos que dura el periodo de los pulsos del
    -- cuarto tren

    signal Pulse1 : std_logic;
    signal Pulse2 : std_logic;
    signal Pulse3 : std_logic;
    signal Pulse4 : std_logic;

begin

    control_estados: process (clk,Reset)

    begin

        if Reset='1' then
            estado<=activacion;
        elsif clk='1' and clk'event then
            case estado is
                when activacion =>
                    if count_Np1 < Np1-1 then
                        estado <= activacion;
                    elsif count_Np1 = Np1-1 and count_Tp1 = Tp1-1 then
                        estado <= acercamiento;
                    end if;
                when acercamiento =>
                    if count_Np2 < Np2-1 then
                        estado <= acercamiento;
                    elsif count_Np2 = Np2-1 and count_Tp2 = Tp2-1 then
                        estado <= pulso_aux;
                    end if;
            end case;
        end if;
    end process;
end;
```



```
        end if;
        when pulso_aux =>
        if count_Np3 < Np3-1 then
            estado <= pulso_aux;
        elsif count_Np3 = Np3-1 and count_Tp3 = Tp3-1 then
            estado <= impacto;
        end if;
    when impacto =>
        if count_Np4 < Np4-1 then
            estado <= impacto;
        elsif count_Np4 = Np4-1 and count_Tp4 = Tp4-1 then
            estado <= espera;
        end if;
        when espera =>
        if count_TSecuencia < TSecuencia-1 then
            estado <= espera;
        elsif count_TSecuencia = TSecuencia-1 and count_NSecuencia < NSecuencia-1 then
            estado <= activacion;
        end if;
        when others =>
        end case;
    end if;
end process control_estados;

contador_NSecuencia: process (Reset,clk)

begin

if Reset='1' then
    count_TSecuencia<=0;
    count_NSecuencia<=0;
elsif clk='1' and clk'event then
    if count_NSecuencia<NSecuencia then
        if count_TSecuencia<TSecuencia-1 then
            count_TSecuencia <= count_TSecuencia+1;
        else
            count_TSecuencia <= 0;
            count_NSecuencia <= count_NSecuencia+1;
        end if;
    else
        count_NSecuencia <= NSecuencia;
        count_TSecuencia <= TSecuencia-1;
    end if;
end if;
end process contador_NSecuencia;

contador_P1: process (Reset,clk)

begin

if Reset='1' then
    count_Tp1<=0;
    count_Np1<=0;
elsif clk='1' and clk'event then
    if estado=activacion then
        if count_Np1<Np1-1 then
            if count_Tp1<Tp1-1 then
                count_Tp1 <= count_Tp1+1;
            end if;
        end if;
    end if;
end if;
end process contador_P1;
```




```
else
    count_Tp1 <= 0;
    count_Np1 <= count_Np1+1;
end if;
elsif count_Np1=Np1-1 then
    if count_Tp1<Tp1-1 then
        count_Tp1 <= count_Tp1+1;
    end if;
end if;
else
    count_Tp1 <= 0;
    count_Np1 <= 0;
end if;
end if;
end process contador_P1;
```

contador_P2: process (Reset,clk)

begin

```
if Reset='1' then
    count_Tp2<=0;
    count_Np2<=0;
elsif clk='1' and clk'event then
    if estado=acercamiento then
        if count_Np2<Np2-1 then
            if count_Tp2<Tp2-1 then
                count_Tp2 <= count_Tp2+1;
            else
                count_Tp2 <= 0;
                count_Np2 <= count_Np2+1;
            end if;
        elsif count_Np2=Np2-1 then
            if count_Tp2<Tp2-1 then
                count_Tp2 <= count_Tp2+1;
            end if;
        end if;
    else
        count_Tp2 <= 0;
        count_Np2 <= 0;
    end if;
end if;
end process contador_P2;
```

contador_P3: process (Reset,clk)

begin

```
if Reset='1' then
    count_Tp3<=0;
    count_Np3<=0;
elsif clk='1' and clk'event then
    if estado=pulso_aux then
        if count_Np3<Np3-1 then
            if count_Tp3<Tp3-1 then
                count_Tp3 <= count_Tp3+1;
            else
                count_Tp3 <= 0;
            end if;
        end if;
    end if;
end if;
end process contador_P3;
```



```
count_Np3 <= count_Np3+1;
end if;
elsif count_Np3=Np3-1 then
  if count_Tp3<Tp3-1 then
    count_Tp3 <= count_Tp3+1;
  end if;
end if;
else
  count_Tp3 <= 0;
  count_Np3 <= 0;
end if;
end if;
end process contador_P3;
```

```
contador_P4: process (Reset,clk)
```

```
begin
```

```
if Reset='1' then
  count_Tp4<=0;
  count_Np4<=0;
elsif clk='1' and clk'event then
  if estado=impacto then
    if count_Np4<Np4-1 then
      if count_Tp4<Tp4-1 then
        count_Tp4 <= count_Tp4+1;
      else
        count_Tp4 <= 0;
        count_Np4 <= count_Np4+1;
      end if;
    elsif count_Np4=Np4-1 then
      if count_Tp4<Tp4-1 then
        count_Tp4 <= count_Tp4+1;
      end if;
    end if;
  else
    count_Tp4 <= 0;
    count_Np4 <= 0;
  end if;
end if;
end process contador_P4;
```

```
Pulse1 <='1' when count_Tp1<p1 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=activacion else '0';
Pulse2 <='1' when count_Tp2<p2 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=acercamiento else '0';
Pulse3 <='1' when count_Tp3<p3 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=pulso_aux else '0';
Pulse4 <='1' when count_Tp4<p4 and count_NSecuencia<NSecuencia and estado=impacto else '0';
```

```
Pulse <=Pulse1 or Pulse2 or Pulse3 or Pulse4;
Fin <='1' when count_NSecuencia=NSecuencia else '0';
```

```
end sintetizable;
```

```
-----
-----GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PARA MULTIPULSOS 3-----
-----
--
-- TestBench
```



```
--
-- Fichero: PulseGen_tb.vhd
--
-- Descripción: Testbench para el modelo del generador de pulsos del circuito de control.
--             Técnica multipulso 3
-----

library WORK, IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use WORK.CounterPack.all;

entity testbench is
end testbench;

architecture TestBench of testbench is

component PulseGen
port( Reset   : in  std_logic;
      clk     : in  std_logic;
      Pulse   : out std_logic;
      Fin     : out std_logic
    );
end component;

signal clk_tb   : std_logic;
signal Reset_tb : std_logic;
signal Fin_tb   : std_logic;
signal Pulse_tb : std_logic;

begin

The_pulse_generator : PulseGen
port map (
  clk   => clk_tb,
  Reset => Reset_tb,
  Fin   => Fin_tb,
  Pulse => Pulse_tb
);

Clockgenerator : process
begin
  clk_tb<='1';
  wait for 0.5*Cycle;
  clk_tb<='0';
  wait for 0.5*Cycle;
end process Clockgenerator;

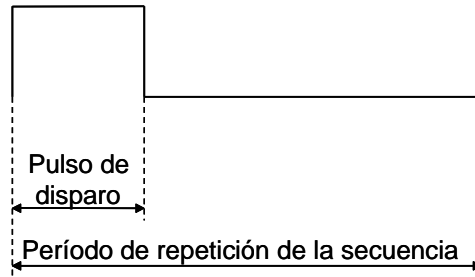
Principal : process
begin
  Res_tb <='1';
  wait for 160*Cycle;
  Res_tb <='0';
  wait until Fin_tb='1';
  assert false
    report "End of simulation"
    severity failure;
end process Principal;
end testbench;
```



ANEXO 2

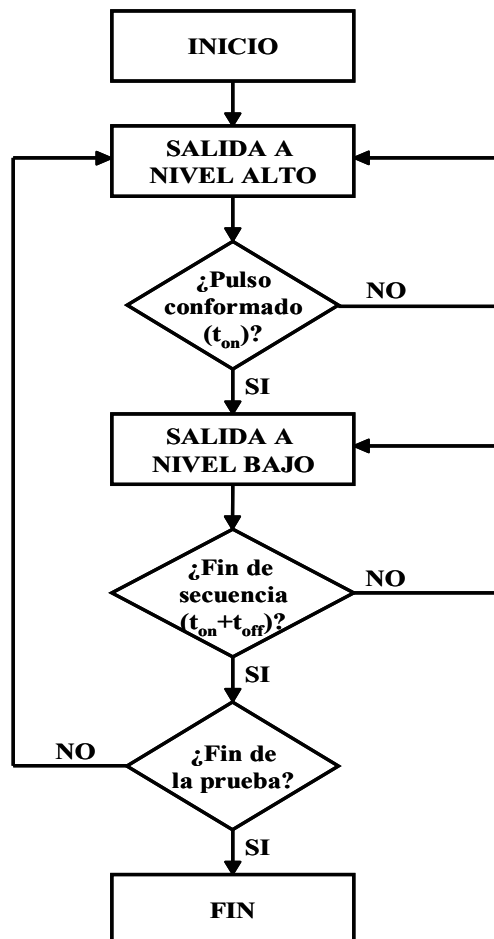
SECUENCIAS Y FLUJOGRAMAS DE LAS SEÑALES DE CONTROL

SECUENCIA DE CONTROL PARA PULSO ÚNICO



Secuencia de la técnica de control de pulso único

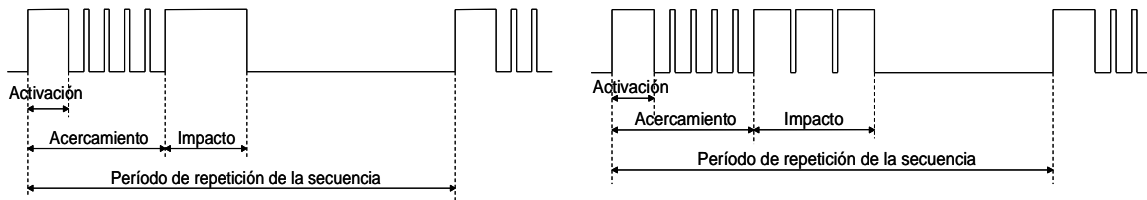
FLUJOGRAMA DE LA SEÑAL DE CONTROL DE PULSO ÚNICO



Flujograma principal para la técnica de generación de pulso único.

SECUENCIA DE CONTROL PARA TÉCNICAS DE MULTIPULSO

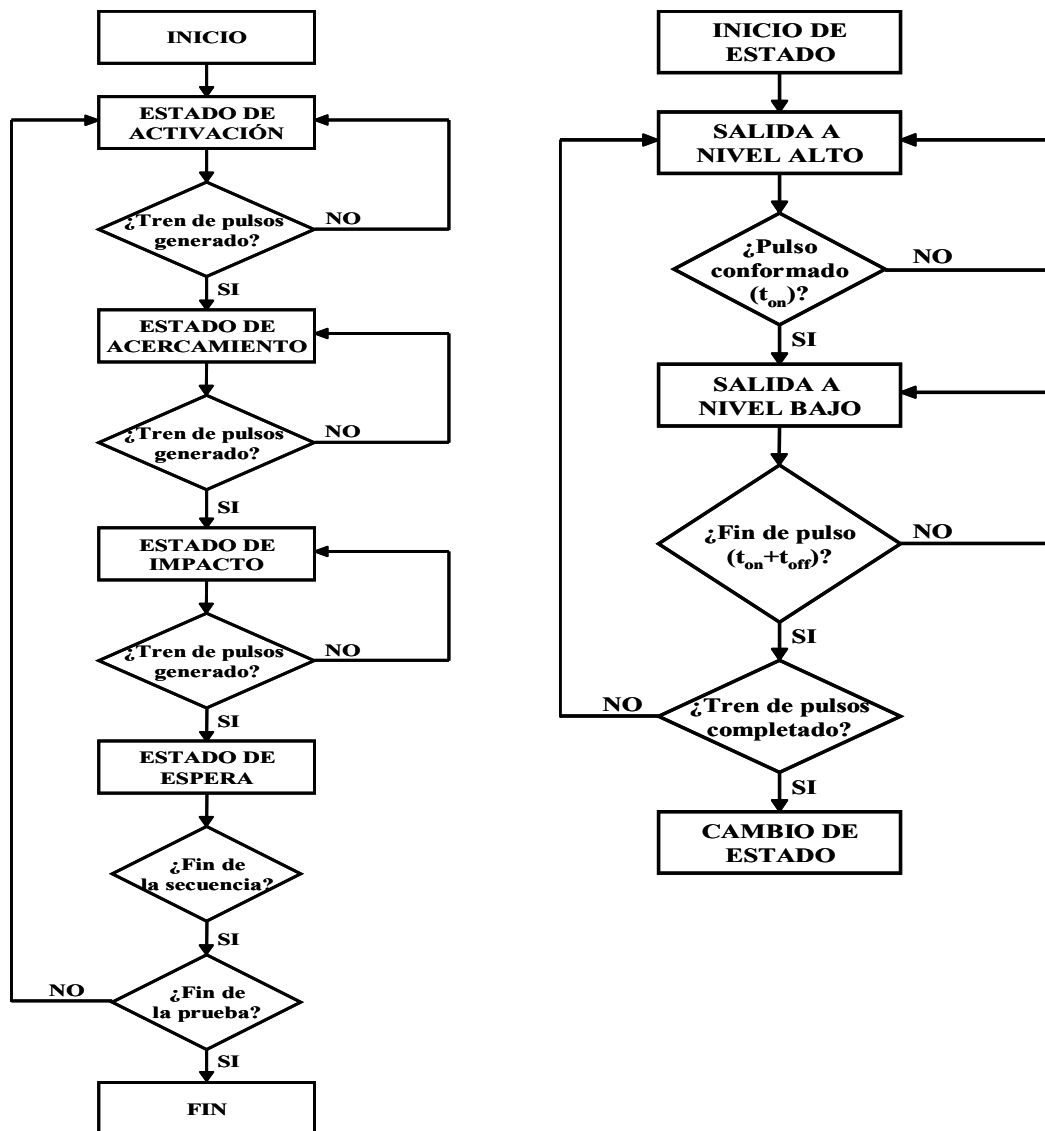
1 Y 2



Secuencia de la técnica de control de multipulso 1

Secuencia de la técnica de control de multipulso 2

FLUJOGRAMAS DE LAS SEÑALES DE CONTROL PARA TÉCNICAS DE MULTIPULSO 1 Y 2

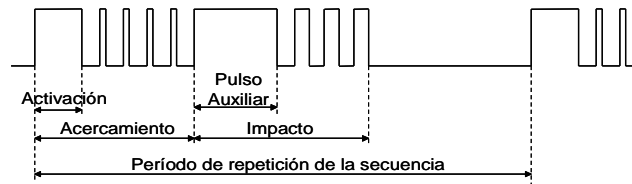


a. Flujograma principal.

b. Flujograma para la generación de cada bloque de pulsos.

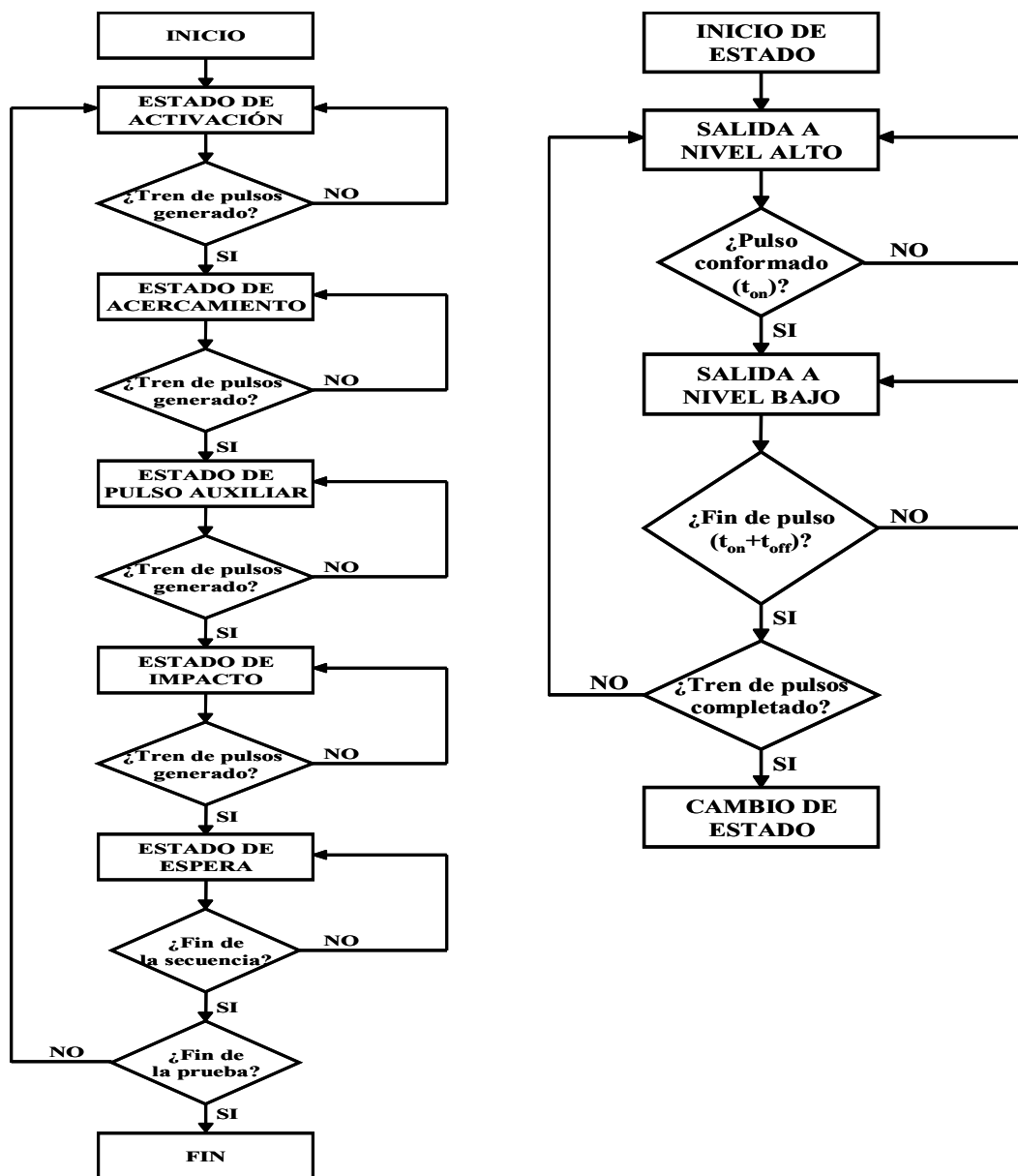
Flujogramas para la generación de las técnicas multipulso 1 y 2.

SECUENCIA DE CONTROL PARA TÉCNICA DE MULTIPULSO 3



Secuencia de la técnica de control de multipulso 3

FLUJOGRAMA DE LA SEÑAL DE CONTROL PARA TÉCNICA DE MULTIPULSO 3



a. Flujoograma principal.

b. Flujoograma para la generación de cada bloque de pulsos.

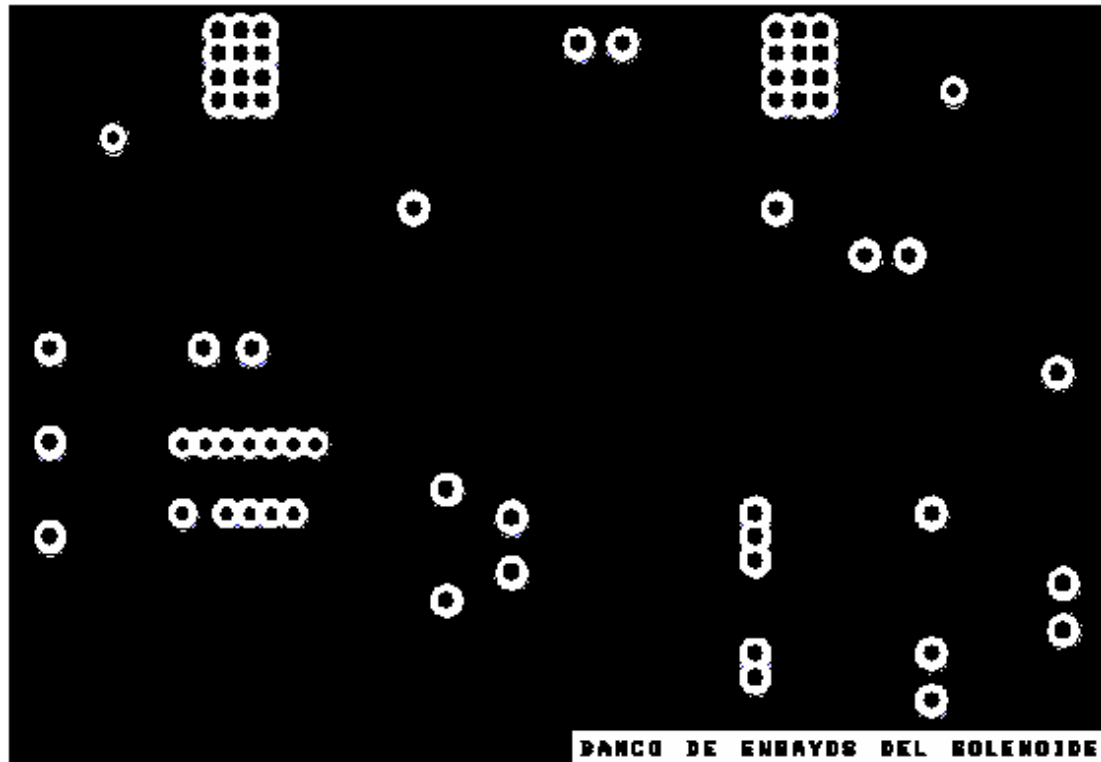
Flujoograma principal para la generación de la técnica multipulso 3.



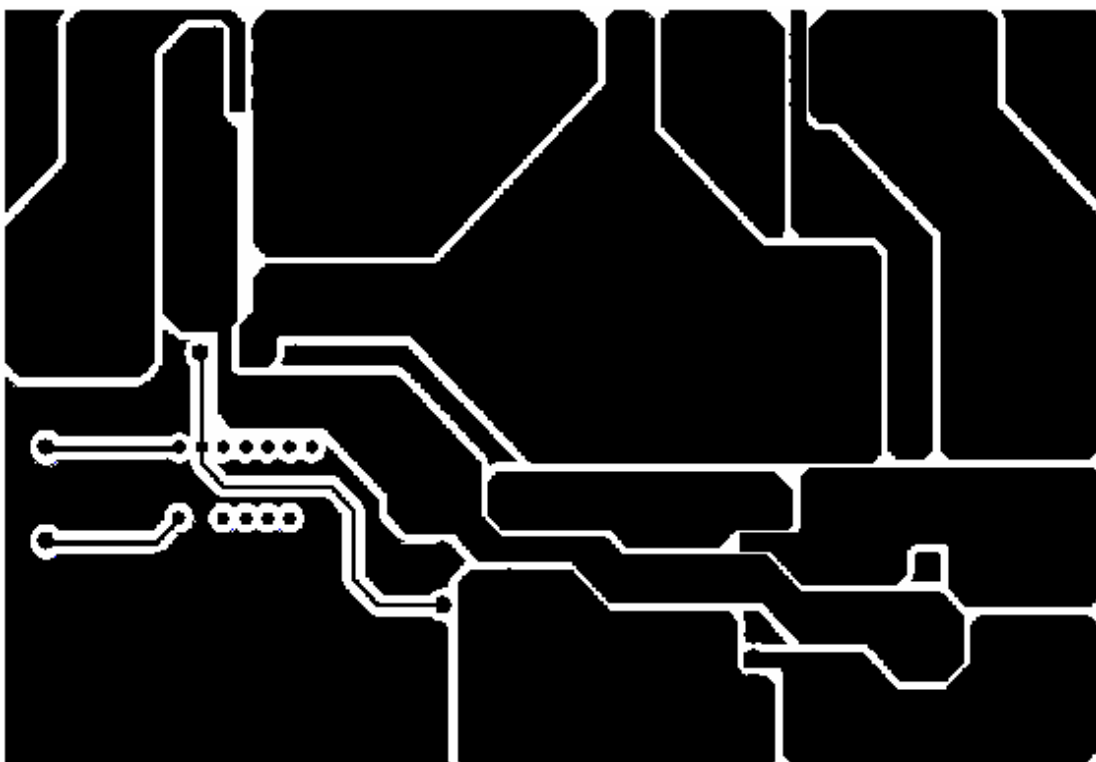
ANEXO 3

PLATAFORMA DE ENSAYOS

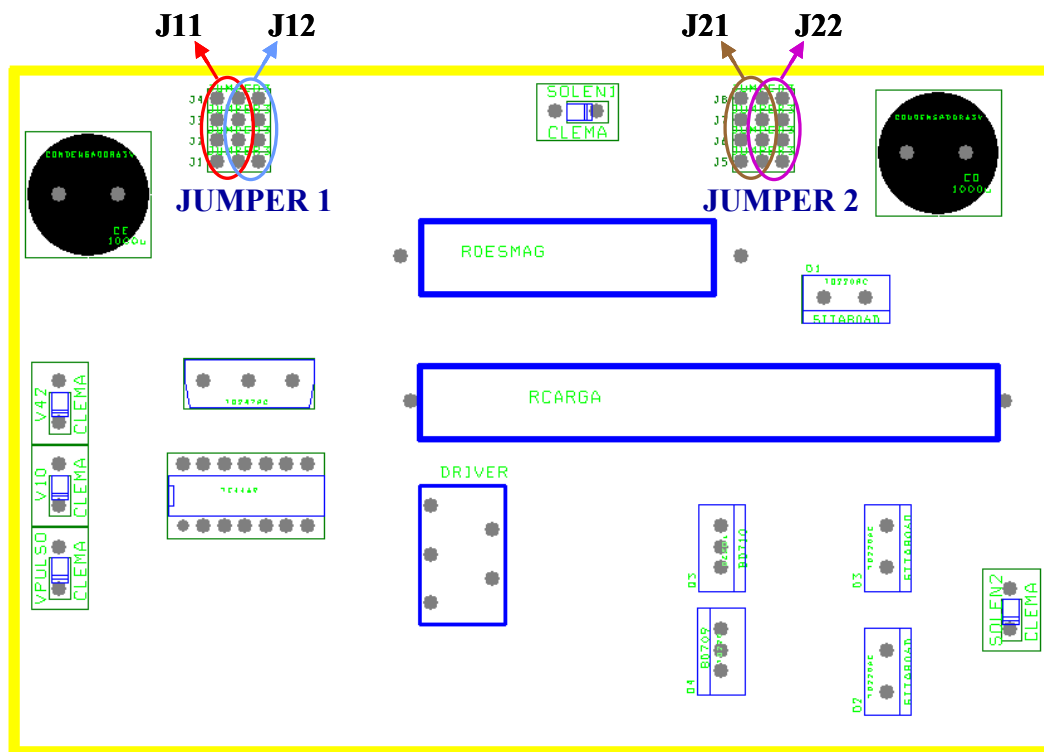
CAPA TOP



CAPA BOTTOM



COMPONENTES



En esta plataforma de ensayos se encuentran implementadas tres topologías para el accionamiento del solenoide. La elección de la topología consiste en modificar la posición de dos *jumpers*, llamados JUMPER 1 y JUMPER 2. A continuación se muestra la topología escogida en función de la posición de ambos *jumpers*.

SELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA

- J11 → CONVERTIDOR DIRECTO CON DOBLE INTERRUPTOR
- J12 {
 - J21 → TOPOLOGÍA CON RED DE DESMAGNETIZACIÓN RD
 - J22 → TOPOLOGÍA ELEVADORA

Además, en función de la topología empleada, el solenoide ha de conectarse a un punto del circuito u otro. En caso de realizar pruebas para la topología elevadora o la



topología con red de desmagnetización RD, la conexión del solenoide ha de hacerse a la clema nombrada como “SOLEN1”, mientras que para realizar ensayos con el convertidor directo con doble interruptor, se ha de conexionar a la clema marcada como “SOLEN2”.